This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

HW 27FY E

War
5158.03

KE 730

HARVARD COLLEGE LIBRARY

BOUGHT FROM THE INCOME OF THE FUND
BEQUEATHED BY
PETER PAUL FRANCIS DEGRAND
(1787–1855)
OF BOSTON

FOR FRENCH WORKS AND PERIODICALS ON THE EXACT SCIENCES
AND ON CHEMISTRY, ASTRONOMY AND OTHER SCIENCES
APPLIED TO THE ARTS AND TO NAVIGATION

MÉMORIAL

DE

L'OFFICIER DU GÉNIE.

N.° 7.

MÉMORIAL

DE

L'OFFICIER DU GÉNIE,

OU

RECUEIL de Mémoires, Expériences, Observations et Procédés généraux propres à perfectionner la fortification et les constructions militaires.

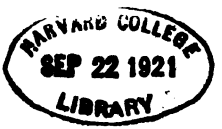
RÉDIGÉ PAR LES SOINS DU COMITÉ.

AVEC L'APPROBATION DU MINISTRE DE LA GUERRE.

A PARIS,
DE L'IMPRIMERIE ROYALE.

1825.

~~War5158.03~~
KE730



DEGRAND FUND

TABLE

DES MATIÈRES CONTENUES DANS LE VII.e NUMÉRO DU MÉMORIAL.

PRIX D'ENCOURAGEMENT. Extrait des registres du comité du génie..... Page 1.

EXTRAIT D'UN MÉMOIRE SUR LES MORTIERS HYDRAULIQUES, par M. le colonel du génie TREUSSART..... 3.

NOTICE SUR LES CHAPES DE VOÛTES, ET SUR LES PAVÉS DE RECOUVREMENT DES PLATES-FORMES AU-DESSUS DES SOUTERRAINS; par M. le lieutenant-colonel du génie DELAAGE..... 37.

NOTICE SUR LES CAUSES DE DESTRUCTION DES REVÊTEMENS EN BRIQUES, ET SUR LES MOYENS D'Y REMÉDIER; par M. le capitaine du génie BERGÈRE (J-B.)..... 65.

MÉMOIRE SUR LA PÉNÉTRATION DES PROJECTILES, par M. le chef de bataillon du génie AUGOYAT..... 86.

MÉMOIRE SUR UN SYSTÈME DE VANNES À AXES HORIZONTAUX, APPLICABLE AUX BARRAGES DES RIVIÈRES SUJETTES À DES CRUES

SUBITES, AINSI QU'AUX ÉCLUSES DE CHASSE ET DE FUITE DES PLACES DE GUERRE ; par M. le capitaine du génie PETITOT..... Page 157.

NOTICE SUR UNE MACHINE HYDRAULIQUE NOMMÉE NORIA-TOURBILLON, *inventée par M. le chef de bataillon du génie* BUREL..... 197.

NOTICE SUR LE TRACÉ DE LA SPIRALE DU PONT-LEVIS À LA DERCHÉ, *par M. le capitaine du génie* GOSSELIN..... 201.

MÉMOIRE SUR LA THÉORIE DES PÉTARDS, ET SES RAPPORTS AVEC CELLES DES MINES ET DES ARMES À FEU ; par M. le lieutenant du génie LE-BLANC (J.-J.)..... 216.

NOTE SUR LES DIVERSES FORMULES PROPOSÉES POUR DÉTERMINER LES CHARGES DES FOURNEAUX DE MINES, par M. le chef de bataillon du génie AUDOY..... 232.

NOTE SUR UNE NOUVELLE DISPOSITION DE LATRINES, communiquée par M. CARRALERO, *garde du génie employé au dépôt des fortifications*..... 265.

NOTE SUR LES COUVERTURES EN PLOMB DES MAGASINS À POUDRE..... 269.

NOTE

SUR QUELQUES RECTIFICATIONS À FAIRE AUX FORMULES DU MÉMOIRE SUR LA POUSSÉE DES VOÛTES, inséré au 4.e numéro du *MÉMORIAL*.

Le manque de temps n'ayant pas permis, lorsqu'on a écrit le mémoire sur la poussée des voûtes, inséré au quatrième numéro du *Mémorial*, d'en revoir les formules avec tout le soin nécessaire, il s'est glissé, dans ces formules, plusieurs erreurs dont on s'est aperçu depuis, et qu'il importe de rectifier. M. le capitaine du génie Villeneuve a bien voulu coopérer à cette rectification, en calculant de nouveau les principales formules de la force horizontale à la clef des voûtes, et en indiquant diverses simplifications dont elles sont susceptibles. On va parcourir les résultats de cette double vérification, et en former ainsi l'*errata* du mémoire.

Page 22, ligne 18 : *au lieu de* leur, *lisez* sa.

Page 25, lignes 12 et 13 :

Le terme Πe, faisant partie des deux formules qu'on trouve ici, doit être compris sous le dénominateur commun, en sorte que les deux formules doivent être

$$\frac{P(\cos.\zeta - f\sin.\zeta) - \Pi e}{\sin.\zeta + f\cos.\zeta} \quad \text{et} \quad \frac{P(\cos.\zeta + f\sin.\zeta) + \Pi e}{\sin.\zeta - f\cos.\zeta}.$$

Mémorial n.° 4.

Page 31, lignes 9 et 10 :

Le dernier terme du second membre de l'équation donnant la force horizontale de la voûte, au lieu d'avoir pour coefficient $\frac{R^3}{3}$, doit être multiplié par $\frac{R^3}{6}$, et l'équation doit s'écrire sous cette nouvelle forme :

$$[F'[a+R(1-\cos.\zeta)]$$
$$=\sin.^2\zeta\frac{(R+a)^2}{6}\left[3(R-a)-\cos.\zeta(R-2a)\right]-\frac{R^3}{6}\left[3\zeta\sin.\zeta-2(1-\cos.\zeta)\right].$$

Même page, lignes 6 et suivantes de la note :

L'équation donnant la force horizontale doit être simplifiée et s'écrire ainsi :

$$I^{\circ}[a+R(1-\cos.\zeta)]$$
$$=\tfrac{1}{2}\gamma'\sin.^2\zeta[a+c+R(1-\cos.\zeta)](R^2-a^2)+\tfrac{1}{3}\gamma\cos.\zeta\sin.^2\zeta(R^3+a^3)$$
$$+\tfrac{1}{2}\zeta\sin.\zeta(1-\gamma)R(R+a)^2-\tfrac{1}{3}(1-\gamma)(1-\cos.\zeta)(R+a)^3-\tfrac{1}{2}R^2\zeta\sin.\zeta+\tfrac{1}{3}R^3(1-\cos.\zeta).$$

Page 32, ligne 12 :

Au lieu de $F'=10{,}27775$, lisez $F'=10{,}281=F$.

Les autres valeurs de F' sont aussi un peu inexactes, mais il n'y a que celle qui correspond à la force horizontale qu'il importait de corriger ici.

Page 35, ligne 21,

Le moment du trapèze curviligne $gdtA$ est fautif et doit s'écrire ainsi :

$$R^2\sin.^2\zeta\left[3n-R(\cos.\zeta+m\sin.\zeta)\right]-\frac{R^3\zeta\sin.\zeta}{2}+\frac{R^3}{3}(1-\cos.\zeta).$$

Par suite de cette correction, l'équation qui donne la force horizontale au bas de la page, devient

$$F'\,[\,a+R(1-\cos.\zeta)\,]$$
$$=\frac{n^2\sin.^2\zeta}{6(\cos.\zeta+m\sin.\zeta)^2}\left[3R(\cos.\zeta+m\sin.\zeta)-n\right]-\frac{R^3}{6}\left[3\zeta\sin.\zeta-2(1-\cos.\zeta)\right].$$

Page 36, lignes 3 et 4, en remontant :

Au lieu de l'équation (2), on emploiera la suivante, qui est beaucoup plus simple :

$$\frac{e^2h}{2}+\frac{e}{2}\left(n^2-\frac{\pi R^2}{2}\right)+R^3\left(\frac{1}{3}-\frac{\pi}{4}\right)+\frac{n^2}{2}\left(R-\frac{n}{3}\right)=F\left(h+a+R\right).$$

Page 42, lignes 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 :

Au lieu des équations successives qu'on trouve ici, on peut, si l'on veut, se servir d'une seule équation, qui est la suivante :

$$F'(a+A-r\cos.\zeta)$$
$$=\tfrac{1}{2}(\zeta-\theta)\,r\sin.\zeta\,[(r+a)^2-r^2]-\tfrac{1}{3}(\cos.\theta-\cos.\zeta)\,[(r+a)^3-r^3]$$
$$+\tfrac{1}{2}\theta\,[r\sin.\zeta+(R-r)\sin.\theta]\,[(R+a)^2-R^2]-\tfrac{1}{3}(1-\cos.\theta)\,[(R+a)^3-R^3].$$

Page 51, ligne 9, en remontant :

Au lieu de $R=\frac{B^2}{2(B-2r)}+B$, lisez $R=\frac{B^2}{4(B-2r)}+B$.

Page 52, ligne 10 : *au lieu de* <, *lisez* >.

Page 53, en tête :

Au lieu de l'équation (K), on emploiera celle-ci, qui est équivalente, et qui est beaucoup plus simple :

$$R=\frac{12B-A(\sqrt{85}+\sqrt{13}-4)}{16-\sqrt{85}-\sqrt{13}}.$$

Page 67, ligne 13 :

Au terme $e\left[\frac{(R+a)^2-R^2}{2}-\frac{a^2\sin.\theta\cos.\theta}{2}\right]$, qui entre dans l'équation d'équilibre, il faut substituer celui-ci :

$$e\left\{\left[\frac{(R+a)^2-R^2}{2}\right]\theta-\frac{a^2\sin.\theta\cos.\theta}{2}\right\}.$$

Page 68, lignes 6, 7, 8, 9, 10, 11 :

Au lieu des équations successives qu'on trouve ici, on emploiera, si l'on veut, les deux suivantes :

$$F(A+a)=\tfrac{1}{2}(A+a)(B^2-a^2\sin.^2\theta)+\tfrac{1}{3}\cos.\theta(B^2R+a^3\sin.^2\theta)-\tfrac{1}{2}R^2B\theta+\tfrac{1}{3}R^2A;$$

$$e^2\left(\frac{A+a+h}{2}\right)+e\left\{B\left(\frac{R+A+2a}{2}\right)-\frac{1}{2}R^2\theta\right\}+\frac{B^2}{6}\left(2R+A+3a\right)-R^2\left(\frac{B\theta}{2}-\frac{A}{3}\right)$$
$$=F(A+a+h).$$

Page 69, en tête :

On peut simplifier beaucoup, et écrire d'abord

$$F'[a+R(1-\cos.\zeta)]$$
$$=\frac{(R-A+n)^2\sin.^2\zeta}{6(\cos.\zeta+m\sin.\zeta)^2}\left\{3R(\cos.\zeta+m\sin.\zeta)-(R-A+n)\right\}-\frac{R^3}{6}\left\{3\zeta\sin.\zeta-2(1-\cos.\zeta)\right\},$$

et ensuite

$$\frac{e^2h}{2}+\frac{e}{2}\left\{\frac{n^2}{m}+(R-A)B-R^2\theta\right\}-R^2\left(\frac{B\theta}{2}-\frac{A}{3}\right)+B^2\left(\frac{R-A}{3}\right)+\frac{Bn^2}{2m}-\frac{n^3}{6m^2}$$
$$=F(A+a+h).$$

Page 80, ligne 7, en remontant :

Au lieu de *articles 16 et 26*, lisez *articles 14 et 25*.

Page 86, ligne dernière :

Au lieu de *l'article 16*, lisez *l'article 14*.

(*N. B.*) Les quantités numériques établies pages 81 et 83, ayant été calculées d'après des formules exemptes d'erreurs, sont exactes à peu de chose près, et le coefficient de la stabilité des voûtes en plein cintre et en anse de panier qui en résulte doit être conservé.

Page 85, ligne 9, en remontant :

Au lieu de *8 pieds*, lisez *20 pieds* $\frac{1}{2}$.

Page 86, ligne 9, en remontant :

Ici la formule du moment de la force de cohésion qui unit le contrefort au pied-droit du magasin n'est qu'approximative ; au lieu d'être égal à $\frac{lh\Pi}{2}\sqrt{h^2+4g^2}$, le véritable moment a pour expression

$$\frac{lg\Pi}{2}\sqrt{h^2+g^2}+\frac{\Pi g^2}{2}(2,3026)\log.\left\{\frac{h+\sqrt{h^2+g^2}}{g}\right\}.$$

On devra donc substituer cette formule à la première par-tout où il y aura lieu.

Page 87, ligne 3, en remontant :

On trouve, par suite de la rectification ci-dessus,

Au lieu de $R = 57,7028$, $R = 57,9349$.

Page 87, ligne dernière :

Par suite de la rectification indiquée ci-dessus pour la page 36, on a ici, au lieu de $M = 41,73648$, $M = 28,1692$.

Page 88, ligne 1, 6 et 11 :

Les mêmes rectifications donnent, au lieu de $\frac{R}{M} = 1,3815$, $\frac{R}{M} = 2,0566$; d'où il suit que le coefficient de stabilité pour les magasins à poudre sans contreforts est égal à 2 à très-peu près.

Même page, ligne 9 :

Au lieu de $e = 2^{m},99764$, on a $e = 3^{m},023$.

Page 88, ligne 7, en remontant, et page 89, ligne 1.re :

L'expression $\frac{Ah\Pi}{2}\sqrt{A^2+h^2}$, qui représente ici le moment de la cohésion des maçonneries sur une section rectangulaire, est inexacte, et ne pouvait passer que pour une approximation : la véritable expression de ce moment est

$$\frac{\Pi}{6}\left\{2Ah\sqrt{A^2+h^2}+A^3(2,3026)\log.\left(\frac{h+\sqrt{A^2+h^2}}{A}\right)\right.$$
$$\left.+h^3(2,3026)\log.\left(\frac{A+\sqrt{A^2+h^2}}{h}\right)\right\};$$

mais elle ne change pas la conclusion qu'on a énoncée d'après la première expression.

Page 95, ligne 14 :

Au lieu de $[p^2e^2+9\Pi^2]$ dans l'équation qu'on trouve ici, lisez $[p^2e^2-9\Pi^2]$.

MÉMORIAL

DE

L'OFFICIER DU GÉNIE.

PRIX D'ENCOURAGEMENT.

EXTRAIT DES REGISTRES DU COMITÉ DU GÉNIE.

Séance du 6 Décembre 1824.

PAR suite de la lettre ministérielle du 24 août 1822, et de l'avis du comité du 13 novembre 1823, inséré au sixième numéro du *Mémorial de l'Officier du génie*, six mémoires ont été adressés à l'inspecteur général du service central, afin de concourir aux prix d'encouragement de 1824.

Le comité, après avoir entendu un rapport détaillé sur chacun de ces mémoires, et en avoir pris ensuite une connaissance approfondie, fixe d'abord son attention sur le mémoire n.° 3, ayant pour objet un système de modifications à introduire dans la disposition actuelle des ouvrages de fortification, en conservant cependant toujours le tracé bastionné.

Le grand intérêt du sujet traité dans ce mémoire, les laborieuses recherches auxquelles l'auteur a dû se livrer, l'investigation judicieuse qu'il a faite des propriétés et des défauts des fortifications existantes, la clarté, la précision du style, aussi bien que la cor-

rection des dessins qui accompagnent le mémoire, commandent de justes éloges : mais, ainsi que l'auteur en convient lui-même, ce travail n'est point achevé ; pour être complet, il faut encore que le mérite des modifications proposées y soit justifié par un journal d'attaque et de défense, et qu'un état estimatif y démontre comparativement que la dépense résultant de l'exécution des nouvelles dispositions restera comprise dans des limites convenables, eu égard à la force défensive du nouveau système.

Le comité ne pouvant donc porter un jugement définitif sur ce travail incomplet, se voit forcé de le distraire du concours de la présente année (1).

Passant ensuite à l'appréciation des autres travaux, le comité reconnaît,

1.° Que le mémoire n.° 1, relatif à un système de vannes à axes horizontaux, également applicable aux barrages des rivières sujettes à des crues subites et à l'éclusement des fossés des places fortes, établit une théorie ingénieuse qui s'adapte à plusieurs cas judicieusement signalés par l'auteur, et que, bien que l'idée principale de ce mécanisme soit déjà connue, le dispositif proposé n'a cependant encore été décrit nulle part avec le détail et la clarté qui peuvent en faire apprécier les avantages, ni appuyé

(1) M. le capitaine du génie Choumara, en se déclarant l'auteur du mémoire n.° 3, postérieurement à la délibération du comité, a demandé à reprendre son travail pour le reproduire ostensiblement, et en soutenir lui-même la discussion. Il a de plus témoigné le desir d'être désigné nominativement dans le *Mémorial*, comme l'auteur de ce mémoire.

des considérations théoriques que renferme le mémoire.

2.° Que le mémoire n.° 2, ayant pour objet une théorie des pétards, comparée à celle des mines et des armes à feu, se distingue par la justesse des idées comme par la finesse des aperçus, et qu'il donne sur les effets variés des charges de mine mélangées à des corps étrangers ou placées près d'espaces vides, des explications satisfaisantes, fondées sur la distinction ingénieuse que l'auteur a su faire entre l'action initiale et l'action finale qu'exercent contre un obstacle les gaz qui se produisent dans l'inflammation de la poudre.

3.° Que les mémoires n.os 4, 5 et 6, bien qu'ils annoncent dans leurs auteurs des connaissances variées et un esprit de recherche auquel on doit applaudir, sont cependant d'un moindre intérêt que ceux qui viennent d'être cités sous les numéros 1 et 2 (1).

Le comité, considérant ensuite que les sujets traités dans les deux mémoires qu'il a particulièrement distingués dans ce concours, sont très-circonscrits, ne pense pas qu'il y ait lieu cette année à accorder de premier prix,

Et il est d'avis

Que les auteurs du mémoire n.° 1, sur les vannes

(1) Le mémoire n.° 4, relatif à la mesure des solides et des surfaces des voûtes d'arêtes, a fixé particulièrement l'attention du comité, qui a pensé qu'il serait utile d'insérer un extrait de ce mémoire au *Mémorial de l'Officier du génie*. Cette insertion aura lieu dans le huitième numéro. Si l'auteur desire qu'elle paraisse sous son nom, il est invité à le faire connaître.

à axes horizontaux, et du mémoire n.° 2, sur la théorie des pétards, méritent chacun d'obtenir un second prix.

Les lettres cachetées annexées aux deux mémoires susdits ayant ensuite été ouvertes, conformément à l'article 3 des dispositions prescrites par S. Exc. le Ministre de la guerre, il a été reconnu,

1.° Que le mémoire n.° 1 a été rédigé par le capitaine du génie Petitot;

2.° Que le mémoire n.° 2 a été rédigé par le lieutenant au 2.e régiment du génie Leblanc (J. J.).

En conséquence, le comité a l'honneur de prier S. Exc. le Ministre de la guerre de vouloir bien décerner une médaille d'or de la valeur de 600 fr. à M. le capitaine du génie Petitot, et une autre médaille d'or de même valeur à M. le lieutenant du génie Leblanc (J. J.).

Pour extrait conforme :

L'Inspecteur général du service central, Président du Comité,

Signé ROGNIAT.

Le Colonel du génie, Secrétaire du Comité,

Signé LAMY.

APPROUVÉ par Son Excellence, le 16 Décembre.

Le comité ne croit pas devoir encore désigner des sujets déterminés pour le concours suivant; en conséquence, il admettra, comme par le passé, tous les ouvrages ayant un but général d'application aux travaux du corps du génie.

Les mémoires envoyés devront être parvenus à l'inspecteur général du service central le 15 octobre 1825, époque de la fermeture du concours.

EXTRAIT
D'UN MÉMOIRE
SUR
LES MORTIERS HYDRAULIQUES,

de *M. le Colonel du génie* TREUSSART (1).

Si l'on prend de la chaux commune, et qu'après l'avoir réduite en pâte avec de l'eau, on la place, soit sous l'eau, soit dans un lieu humide, elle reste constamment à l'état de pâte. La même chose a lieu si l'on fait avec cette chaux du mortier dans lequel on ne met que du sable.

---

(1) Depuis 1816, on a fait à Strasbourg beaucoup de travaux qui ont exigé l'emploi de chaux hydraulique et de trass. A cette occasion, M. le colonel Treussart s'est occupé de recherches étendues sur les mortiers hydrauliques, dans la vue de donner aux constructions la plus grande solidité possible, et de diminuer la dépense. En 1822, il a adressé sur cet objet, au comité du génie, un premier mémoire, dont le résumé se trouve dans le *Moniteur* du 22 janvier 1823, et qui a été suivi d'un second travail plus détaillé, envoyé le 1.er octobre de la même année. Les bornes du *Mémorial* ne permettant pas d'y insérer en entier ce dernier travail, qui d'ailleurs comprend plusieurs essais de mortiers non encore terminés, on croit utile de communiquer provisoirement cet extrait aux officiers du génie, sans rien préjuger cependant sur la généralité des résultats que les expériences relatées semblent promettre.

Cet extrait a été fait par l'auteur du mémoire.

On trouve dans quelques endroits une espèce de chaux qui a des propriétés tout-à-fait différentes : si on la réduit en pâte avec de l'eau peu de temps après sa sortie du four, et qu'on plonge cette pâte sous l'eau, elle durcit plus ou moins promptement, suivant sa qualité. On obtient le même résultat en mêlant du sable avec cette chaux pour en faire du mortier.

Ces sortes de mortiers sont indispensables pour toutes les constructions qui se font dans l'eau et pour les maçonneries qui sont dans les lieux humides. Les citernes, les souterrains, les mines, les soubassemens des revêtemens dans des fossés pleins d'eau, &c. doivent donc être faits avec ces sortes de mortiers.

En Angleterre et en Allemagne, on a donné à ces sortes de chaux le nom de *chaux aquatiques*; en France on les nomme *chaux hydrauliques*. Comme elles sont indispensables pour plusieurs constructions, les chimistes les plus célèbres se sont occupés depuis long-temps de rechercher la cause qui leur donnait cette propriété; malgré tant de recherches, cette question n'est point encore complétement résolue.

Les départemens du Haut et du Bas-Rhin contiennent beaucoup de chaux hydrauliques : les carrières qui les fournissent se trouvent à peu de distance du pied des Vosges. On a fait beaucoup d'expériences pour connaître quelles étaient les chaux qui donnaient les meilleurs résultats depuis Béfort jusqu'à Weissembourg. Celles qui ont paru les meilleures, sont les chaux d'Obernai, de Werd, de Bouxviller et d'Ing-

viller. Depuis Béfort jusqu'à Weissembourg, toutes les pierres à chaux hydrauliques qui ont été essayées, sont d'une couleur bleu d'ardoise, comme celles de Metz : une seule était blanche; c'est une pierre à chaux provenant d'Altkirch près Béfort : elle est assez bonne, mais elle ne vaut pas celles des autres lieux qu'on vient de nommer. Presque toutes les chaux hydrauliques dont on vient de parler renferment des traces de coquillages : celle d'Obernai en renferme le plus; on y trouve souvent le coquillage appelé *corne d'Ammon*, dont l'espèce est perdue. Il y en a qui ont plus de $0^{m}.50$ de diamètre.

Lorsque ces chaux sont calcinées au degré convenable, elles sont d'un jaune fauve ou d'un gris cendré; lorsqu'elles sont très-fortement chauffées, elles sont d'un bleu d'ardoise; on voit qu'elles ont déjà éprouvé un commencement de vitrification. Dans cet état, elles s'éteignent très-difficilement; elles ont perdu une grande partie de leur propriété hydraulique. Si on les emploie à l'air lorsqu'elles sont trop cuites, elles peuvent occasionner des accidens très-graves, attendu qu'elles se dilatent considérablement et peuvent soulever des pierres très-grosses. Il est donc important de n'employer ces sortes de chaux que lorsqu'elles sont cuites à point.

On a fait venir de la chaux de Metz pour la comparer aux chaux hydrauliques d'Alsace : on a reconnu que celles dont on a parlé ci-dessus ne le cédaient en rien à la chaux de Metz. Voici les moyens qui ont été employés pour mesurer la force des mortiers.

Lorsque les mortiers ont été faits, on les a placés

dans de petites caisses de bois de $0^m.15$ de longueur, de $0^m.07$ de largeur, sur autant de profondeur. Ces mortiers ont été plongés dans l'eau douze heures après leur confection; ils n'avaient acquis au bout de ce temps qu'une demi-consistance, ce qui a permis de juger le temps qu'ils ont mis à durcir. Tous les mortiers ont été laissés pendant un an dans l'eau. Au bout de ce temps, on les en a retirés, et on les a taillés de manière à former des parallélipipèdes de $0^m.15$ de longueur sur $0^m.05$ d'écarrissage. On a ensuite placé ces parallélipipèdes de mortiers sur deux barres de fer horizontales et distantes entre elles de $0^m.10$; on leur a fait supporter des poids appliqués sur leur milieu jusqu'à ce qu'ils se soient rompus. Afin d'avoir un terme de comparaison avec des résistances connues, on a taillé des briques suivant les dimensions ci-dessus. Les briques communes de Strasbourg ont supporté un poids moyen de deux cent dix kilogrammes avant de se rompre. Les mortiers hydrauliques ne doivent être considérés comme bons que lorsqu'ils ont acquis au bout d'un an une résistance telle qu'en les taillant suivant les dimensions ci-dessus, ils peuvent supporter un poids d'environ deux cents kilogrammes avant de se rompre. L'expérience apprend que la résistance des mortiers hydrauliques va en augmentant pendant plusieurs années. Ceux qui ont acquis au bout d'un an une résistance égale à celle des briques communes, sont susceptibles d'acquérir avec le temps une résistance égale à celle des pierres ordinaires.

Sur un grand nombre d'expériences faites avec de la chaux d'Obernai et du sable, on n'a obtenu qu'un

seul mortier qui ait soutenu un poids de cent quatre-vingt-douze kilogrammes avant de se rompre. Il y en a qui se sont rompus sous le faible poids de cinquante kilogrammes, et leur résistance moyenne peut à peine être portée à cent kilogrammes. Les autres chaux et celles de Metz ont offert des résultats à peu près semblables. Les pierres à chaux d'une même carrière ont souvent présenté des résultats très-différens, quoiqu'elles fussent de la même apparence et qu'elles eussent éprouvé le même degré de calcination : d'après cela, on est porté à croire que toutes les pierres à chaux de ces carrières ne sont pas de même nature.

D'après ces résultats, on pense qu'il n'est pas prudent d'employer les chaux hydrauliques d'Alsace et de Metz avec du sable seulement, lorsqu'il s'agit de constructions importantes, telles que celles des écluses, batardeaux, &c. ; mais si l'on mélange du trass avec ces chaux, pour en faire du mortier, alors on obtient toujours de très-bons mortiers. Un résultat singulier et bien important, c'est que tous les mortiers faits avec ces chaux, du sable et du trass, sont meilleurs que ceux où il n'entre que de la chaux et du trass. Ce résultat est très-avantageux, puisqu'il procure une grande économie, à cause du prix élevé du trass en comparaison de celui du sable. Les proportions de sable et de trass qu'on doit mélanger avec les chaux hydrauliques qui ont été traitées, ont varié suivant les diverses espèces de chaux. En les éteignant avec un peu d'eau, de manière à obtenir de la chaux en poudre sèche, l'expérience a fait connaître que la

chaux éteinte en poudre et mesurée en volume devait être mélangée avec du sable ou du trass dans la proportion d'une partie de chaux contre une et demie ou deux parties de ces substances. Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque le sable et le trass se trouvaient en proportions égales. Si l'on prend une partie de chaux vive d'Obernai et qu'on l'éteigne avec assez d'eau pour la réduire en pâte, on ne trouve aucune augmentation dans le volume; si on l'éteint en n'y versant que le cinquième de son volume d'eau, alors la chaux ne se réduit qu'en poudre sèche, et le volume primitif de la chaux est augmenté de deux cinquièmes environ. Une partie de cette chaux éteinte en poudre, une partie de sable et une partie de trass, forment toujours d'excellens mortiers hydrauliques. L'influence du trass est telle, que beaucoup de mortiers faits avec des chaux moyennement hydrauliques et du sable n'ont supporté que des poids de vingt à trente kilogrammes avant de se rompre, tandis que les mortiers faits avec les mêmes chaux, du sable et du trass, ont supporté plus de deux cents kilogrammes.

Dans de grands travaux, il n'est pas toujours possible d'employer la chaux à mesure qu'elle arrive sur l'atelier; il est donc important de connaître quel est le meilleur moyen de la conserver pendant quelque temps. Si l'on éteint de la chaux hydraulique comme la chaux commune, c'est-à-dire, avec la quantité d'eau nécessaire pour la réduire en pâte, alors on est obligé de l'employer peu de temps après l'extinction, attendu que si on la laissait pendant trois ou quatre jours dans cet état, elle deviendrait

très-dure et il serait impossible d'en faire du mortier. Après quelques essais, on a reconnu qu'en éteignant les chaux hydrauliques d'Alsace avec le cinquième de leur volume d'eau, on pouvait en faire du mortier pendant plusieurs mois sans qu'on y aperçût des points blancs, ainsi que cela a lieu lorsqu'on emploie de la chaux qui a été éteinte depuis quelque temps avec une plus grande quantité d'eau: ces points blancs sont de petites portions de chaux, qui, ayant été réduites en pâte, ont pris de la dureté et ne sont plus susceptibles de faire corps avec le sable.

On a fait des expériences pour connaître l'effet que les chaux hydrauliques d'Alsace éprouvaient lorsqu'on les laissait exposées à l'air pendant quelque temps. Pour cet effet, on a pris divers morceaux de chaux hydrauliques qu'on a divisés en deux parties; on a laissé l'une s'éteindre d'elle-même à l'air, et l'on a éteint l'autre moitié avec le cinquième de son volume d'eau, pour la réduire en poudre sèche. On a reconnu en général que ces chaux perdent presque toutes leurs propriétés hydrauliques au bout de trois à quatre mois, soit qu'on les éteigne en poudre sèche avec un peu d'eau, soit qu'on les laisse s'éteindre d'elles-mêmes à l'air. Dans cet état, on a cependant obtenu toujours de très-bons mortiers en ajoutant du trass au sable. Quelques-unes de ces chaux ont donné de meilleurs résultats lorsqu'on les a éteintes en poudre avec un peu d'eau, qu'en les laissant s'éteindre d'elles-mêmes à l'air. D'autres chaux ont donné un résultat opposé; c'est-à-dire que celles qu'on a laissées s'éteindre à l'air ont donné de meilleurs mortiers que celles qu'on

a éteintes en poudre sèche. Quelques-unes des chaux dont on a fait l'essai, demandent à être employées peu de temps après leur extinction; d'autres ont durci beaucoup plus vîte et ont acquis plus de consistance en les laissant à l'air pendant vingt jours environ après les avoir éteintes en poudre sèche avec un peu d'eau. On voit donc qu'il est bien important, avant d'employer les chaux hydrauliques naturelles, de connaître la manière dont on doit les traiter; sans cela on se trouverait exposé à faire de mauvais mortiers avec de la chaux très-bonne. L'addition d'un peu de trass a toujours corrigé la perte que les chaux hydrauliques ont pu faire, soit par le défaut de cuisson, soit par une exposition trop longue à l'air.

L'auteur a été long-temps sans pouvoir se rendre compte des phénomènes dont on vient de parler. Les chimistes ont reconnu que la chaux était un oxide métallique et qu'elle n'était plus susceptible d'absorber une nouvelle quantité d'oxigène; mais la chaux éteinte, c'est-à-dire, l'hydrate de chaux, peut avoir des propriétés différentes et avoir une action sur l'air; pour s'en assurer, on a fait l'expérience suivante.

On a pris un morceau de marbre blanc qu'on a fait calciner dans le four à chaux; aussitôt après sa sortie du four, on l'a pulvérisé et on l'a divisé en deux parties égales; l'une de ces parties a été éteinte avec un peu d'eau, et l'on a laissé l'autre à l'état de chaux vive; on a mis la chaux vive et la chaux éteinte chacune dans un verre qu'on a placé sur une assiette au fond de laquelle il y avait un peu

d'eau ; on a ensuite recouvert les deux verres qui contenaient la chaux par deux autres verres un peu plus larges et dont les extrémités plongeaient dans l'eau ; de cette manière, la chaux n'était plus en contact avec l'atmosphère, et elle ne communiquait avec l'eau qui était dans l'assiette qu'au moyen de la colonne d'air qui se trouvait entre les deux verres. Au bout de cinq à six jours, l'eau a monté d'une manière sensible entre les deux verres qui contenaient la chaux éteinte; au bout d'une vingtaine de jours, elle était montée d'un décimètre. L'eau n'avait monté que très-peu entre les deux verres où se trouvait la chaux vive. Cette expérience a été répétée plusieurs fois, et l'on a toujours obtenu le même résultat. L'auteur en a fait part à M. Coze, professeur de pharmacie à l'académie de Strasbourg, en le priant de déterminer la quantité d'oxigène qui avait été absorbée dans les deux cas. Pour connaître la quantité d'oxigène absorbée, on a pris un cylindre de verre gradué; on y a introduit une mesure d'air atmosphérique et deux mesures de deutoxide d'azote [gaz nitreux] : aussitôt l'air est devenu rouge et le résidu a marqué 1 12 à l'échelle du tube. On a fait la même expérience avec l'air qui avait été en contact avec la chaux vive : il s'est également manifesté une couleur rouge, et le résidu a marqué 1 17. On a fait une expérience semblable avec l'air qui avait été en contact avec la chaux éteinte : la couleur rouge a été très-faible, et le résidu a marqué 1 32 à l'échelle du tube. Dans ce dernier cas, il y a donc eu une grande quantité d'air absorbée par la chaux éteinte. On s'est convaincu que c'était l'oxigène qui avait été absorbé ;

en mêlant du gaz hydrogène avec le gaz restant, il n'y a point eu de détonation par l'étincelle électrique. Il est difficile d'expliquer pourquoi la chaux vive, qui avait absorbé une portion de l'eau contenue dans l'assiette et qui était passée lentement à l'état d'hydrate de chaux, n'a absorbé que très-peu d'oxigène, tandis que la chaux qui a été éteinte avec de l'eau, l'a absorbé presque en entier.

Les phénomènes ci-dessus n'ayant été observés que depuis peu, il n'y a pas eu encore assez d'expériences de faites pour qu'on puisse en déduire des règles générales; mais on voit que la chaux éprouve un changement en passant à l'état d'hydrate, et que dans cet état elle absorbe de l'oxigène. Quelques chaux gagnent à absorber une nouvelle quantité d'oxigène, et d'autres y perdent de leurs propriétés hydrauliques.

DES CHAUX HYDRAULIQUES ARTIFICIELLES.

Depuis long-temps les meilleurs chimistes ont cherché quelles étaient les substances qui donnaient à la chaux la propriété de durcir dans l'eau. Le célèbre Bergmann a attribué cette propriété à l'oxide de manganèse, et cette opinion a été admise pendant long-temps. On a enfin trouvé des chaux très-hydrauliques qui ne contenaient point de manganèse. Alors les opinions se sont divisées. Les uns ont attribué la propriété hydraulique tantôt au fer, tantôt à la magnésie, &c. M. de Saussure a pensé que cette propriété était due à la réunion de la silice et de l'alumine, c'est-à-dire, à l'argile. M. Descotils a pensé que c'était la silice qui donnait cette pro-

priété à la chaux. M. Vitalis, chimiste de Rouen, a annoncé, en 1807, que l'analyse de diverses pierres à chaux l'avait porté à conclure que la propriété hydraulique était due à l'argile. Le chimiste anglais Thomson dit aussi que l'addition d'un peu d'argile au mortier lui fait acquérir la propriété importante de durcir sous l'eau.

M. Guyton de Morveau a annoncé, il y a long-temps, qu'il avait fait de la chaux hydraulique artificielle, en mêlant de l'argile et de l'oxide noir de manganèse avec de la pierre à chaux commune pulvérisée, et en faisant calciner le tout.

Il y a long-temps aussi que M. Thénard a annoncé qu'il avait fait des chaux hydrauliques artificielles, en faisant calciner de la pierre à chaux commune avec des terres ocreuses.

M. Vicat, ingénieur des ponts et chaussées, a également proposé de faire des chaux hydrauliques artificielles, en prenant de la chaux commune qu'on réduit en pâte avec de l'eau et qu'on fait calciner une seconde fois en y ajoutant une petite quantité d'argile, qui varie depuis un jusqu'à trois dixièmes, suivant l'espèce de chaux qu'on emploie.

On a répété toutes les expériences dont on vient de parler ci-dessus; voici les principaux résultats qu'on a obtenus et que l'auteur a déjà annoncés au mois de décembre 1822.

Le manganèse, le fer et la magnésie n'ont donné aucun résultat hydraulique. En faisant des expériences avec le fer, on a eu occasion de reconnaître que ce métal, lorsqu'il était à l'état d'oxide rouge,

avait une action marquée sur la chaux. En faisant recuire une partie de chaux en pâte avec deux dixièmes d'oxide rouge de fer, la chaux n'a plus donné aucune chaleur lorsqu'on l'a éteinte avec de l'eau.

La silice, la terre blanche très-alumineuse et les terres ocreuses ont donné des mortiers hydrauliques; mais ils n'ont présenté qu'une faible résistance, et le durcissement a été très-lent.

On a fait plusieurs expériences avec différentes terres argileuses dont on fait les briques dans les environs de Strasbourg, en suivant le procédé indiqué par M. Vicat, et l'on n'a obtenu aucun bon résultat. Une seule terre a donné un résultat passable; c'est celle que l'on trouve au village de Holzheim, sur la Bruche, près Strasbourg. Cette terre est grasse et rougeâtre; elle ne contient presque point de chaux; on y trouve des débris de végétaux.

Parmi les chaux hydrauliques naturelles, il en est une qui jouit d'une grande réputation; c'est celle qui provient des galets de Boulogne. On en a fait venir, et voici les résultats qu'on a obtenus: on a trouvé que cette chaux durcissait avec une promptitude admirable, mais les résistances des mortiers qu'on en a faits n'ont point répondu à ce qu'on en espérait d'après la promptitude du durcissement, qui a eu lieu dans les vingt-quatre heures. Les mortiers faits avec les galets de Boulogne ont supporté des poids qui ont varié depuis quarante-neuf jusqu'à soixante-douze kilogrammes; un seul de ces mortiers a supporté un poids de cent trente kilogrammes avant de se rompre. Les galets qui avaient fourni ce dernier

mortier, avaient été plus calcinés que les autres, et on les avait laissés pendant vingt et quelques jours à l'air sans les éteindre. Des galets qu'on a pulvérisés et éteints avec un peu d'eau, et qu'on a laissés exposés à l'air pendant quelques jours, ont perdu de leur force.

On n'a obtenu que de très-mauvais mortiers en ajoutant aux galets de Boulogne un peu de sable et même un peu de trass; c'est la seule chaux dont le mélange avec le trass ait donné ce résultat. D'après l'analyse que les chimistes ont faite des galets de Boulogne, cette substance singulière serait composée, après la calcination, des substances suivantes, savoir : chaux, — 56.3; silice, — 24.6; alumine, — 7.8; fer, — 11.4.

L'auteur a pris toutes les substances ci-dessus et dans les mêmes proportions; il en a fait une pâte qu'il a fait recuire au four à chaux : on n'a eu qu'une chaux hydraulique semblable à celle qu'on avait obtenue avec les terres ocreuses; mais on n'a point trouvé dans cette chaux le principal caractère des galets de Boulogne, qui est un très-prompt durcissement; ces mortiers ont mis environ un mois à durcir, tandis que les galets de Boulogne donnent un mortier qui durcit, comme on l'a dit, en vingt-quatre heures. La résistance de ces mortiers a également été très-faible. Des résultats aussi différens ont fait penser à l'auteur que quelque substance avait échappé dans l'analyse qu'on a faite des galets de Boulogne. Il a, en conséquence, cherché quelle pouvait être cette substance. Après plusieurs essais, il a reconnu que tous ceux de ces galets qu'il avait employés,

contenaient de la soude; quelques-uns lui ont présenté des traces de potasse. Après avoir reconnu la présence de la soude et de la potasse dans les galets de Boulogne, on a fait les expériences suivantes. On a fait recuire dans un four à chaux une partie de chaux en pâte, en y mêlant deux dixièmes de terre blanche très-alumineuse; on en a ensuite fait du mortier en y ajoutant du sable: le durcissement a été d'environ un mois, et ce mortier, après avoir été un an dans l'eau, s'est rompu sous le faible poids de vingt kilogrammes. Un mortier fait avec les mêmes substances, dans lequel on a mis une petite quantité de soude, a durci dans l'espace de huit jours et a supporté un poids de cent trente-sept kilogrammes avant de se rompre. La quantité de soude employée était très-petite, puisqu'on n'y a mis que de l'eau de soude à 5° et qu'on n'en a pris que le quart du volume de la terre alumineuse, qui elle-même ne formait que les deux dixièmes de la chaux. On a depuis répété ces expériences en augmentant la quantité de soude. On a également fait des mortiers semblables avec de la potasse, mais ils ne sont point encore rompus. Les mortiers qui ont été rompus suffisent pour faire connaître l'influence de la soude. L'auteur présume que s'il a obtenu de meilleurs résultats de la terre de Holzheim que de toute autre, ils sont dus à ce que cette terre contient des débris de végétaux qui peuvent donner de la potasse ou de la soude par la calcination. D'après les débris de coquillages renfermés dans les meilleures chaux hydrauliques d'Alsace, il est porté à croire que ces pierres à chaux ont reçu quelque modification par le muriate

de soude contenu dans les eaux de la mer, qui paraissent avoir couvert les plaines où elles se trouvent. On a mis des pierres à chaux communes dans de l'eau salée à 15°; au bout de six mois la pesanteur spécifique de l'eau était diminuée, et la chaux provenant de ces pierres n'a plus donné autant de chaleur au moment de l'extinction : au lieu d'être blanche comme elle l'est ordinairement, elle était d'une couleur cendrée. Cette chaux est devenue légèrement hydraulique.

Malgré toutes les recherches qui ont été faites sur les mortiers hydrauliques, la théorie n'en est pas encore bien connue. Plusieurs substances peuvent donner à la chaux la propriété de devenir hydraulique, ainsi qu'on l'a vu; mais il paraît bien difficile de faire artificiellement de bonnes chaux hydrauliques. On pense généralement aujourd'hui que cette propriété est due à une certaine quantité d'argile; mais l'analyse de différentes pierres à chaux fait connaître que de deux chaux qui contiennent à peu près la même quantité d'argile, l'une est très-hydraulique et l'autre ne l'est pas du tout. On a vu qu'on obtenait de bons résultats en mêlant avec la chaux une certaine quantité de terre alumineuse et un peu de soude; tout fait espérer que ces résultats seront encore meilleurs lorsque l'expérience aura fait connaître les proportions qu'il convient d'employer.

DES POUZZOLANES ET DES TRASS NATURELS ET ARTIFICIELS.

La pouzzolane est une substance qui se tire du

village de Pouzzol, situé au pied du Vésuve, et le trass se trouve auprès d'Andernach, sur les bords du Rhin, au pied d'un ancien volcan éteint.

D'après l'analyse qui a été faite de ces deux produits, la pouzzolane contiendrait sur dix parties les substances suivantes, savoir: alumine, — 4; silice, — 3.5; chaux, — 0.5; fer, — 2.

Le trass contiendrait les mêmes substances dans les proportions suivantes: alumine, — 2.8; silice, — 5.7; chaux, — 0.65; fer, — 0.85.

L'auteur a fait venir de la pouzzolane pour la comparer au trass qu'on employait dans les constructions de la place. Toutes les fois qu'on a fait des expériences avec la même chaux et dans les mêmes circonstances, on a obtenu des résultats un peu meilleurs avec les pouzzolanes qu'avec les trass; mais la différence n'est pas assez grande pour qu'on doive préférer l'emploi de la pouzzolane, lorsqu'on peut se procurer le trass à meilleur marché.

De nombreuses expériences faites par l'auteur ne laissent aucun doute sur la facilité avec laquelle on peut faire de très-bons mortiers hydrauliques en employant la chaux commune avec la pouzzolane ou le trass. Il s'étonne que plusieurs constructeurs aient une opinion contraire, et que M. Gauthey, inspecteur général des ponts et chaussées, ait dit, dans son excellent traité de la construction des ponts, qu'avec de la chaux grasse et de la pouzzolane on ne peut point faire de mortiers qui prennent de la consistance dans l'eau. Un grand nombre d'expériences faites à ce sujet

prouvent que les chaux grasses ou communes font d'excellens mortiers hydrauliques avec les trass ou les pouzzolanes; ce fait important était même connu des anciens, puisque Vitruve en parle.

Il serait impossible d'employer le trass ou la pouzzolane dans certains pays, à cause du prix élevé auquel ces substances reviendraient; mais par-tout on peut faire, à un prix modéré, des trass ou des pouzzolanes artificiels égaux et même supérieurs *en qualité* à ces produits naturels. Cette question importante a occupé plusieurs constructeurs et plusieurs chimistes célèbres; cependant on n'est point encore d'accord sur la manière dont on doit faire les trass ou pouzzolanes artificiels. D'après plusieurs constructeurs, les argiles dont on doit former le trass factice doivent être fortement calcinées; selon d'autres, elles doivent être très-peu cuites. On verra que l'objet important est la composition des argiles qui doivent être employées. On va indiquer sommairement les divers essais qui ont été faits jusqu'ici sur la fabrication des trass ou pouzzolanes artificiels.

M. Baggé, ingénieur suédois, paraît être le premier qui ait cherché à faire des trass ou pouzzolanes *factices*; mais il ne s'est occupé que des schistes: les essais qu'il a faits à cet égard ne paraissent pas avoir donné des résultats avantageux.

Les Hollandais fabriquent depuis long-temps un trass artificiel, qui passe pour être bon, en faisant calciner un banc d'argile que l'on extrait du fond de la mer. Il résulte de l'analyse que Bergmann a faite de cette argile, qu'elle contient les mêmes

substances que le trass, et à peu près dans les mêmes proportions.

En 1778, M. Faujas de Saint-Fond est parvenu à fabriquer des trass factices en faisant calciner des terres argileuses.

En 1787, M. Chaptal a publié un mémoire sur les pouzzolanes artificielles; il a employé les terres ocreuses qui se trouvent en abondance dans les pays méridionaux de la France et dans les Basses-Alpes. M. Chaptal n'a point reconnu l'influence que la chaux exerce dans la fabrication des trass ou pouzzolanes factices; ce savant chimiste pensait que l'alumine, quoique faisant partie essentielle d'une bonne pouzzolane, y jouait le moindre rôle, et il attribuait en grande partie les propriétés des trass ou pouzzolanes à l'action que l'oxide de fer exerce sur la silice; il pensait que les argiles dépourvues de fer, et soumises à la calcination, ne pouvaient être employées comme pouzzolanes.

En 1805 et 1807, M. Gratien Lepère, ingénieur des ponts et chaussées, a publié les expériences qu'il a faites à Cherbourg dans le but de fabriquer des pouzzolanes artificielles; cet ingénieur s'est borné, comme l'ingénieur suédois, à faire calciner des schistes. L'institut nomma une commission pour examiner ces expériences; elle reconnut que les mortiers faits avec les schistes calcinés étaient beaucoup moins bons que ceux dans lesquels on avait fait entrer de la pouzzolane.

En 1819, M. Vicat, ingénieur des ponts et chaussées, a envoyé à l'institut un mémoire sur les pouzzolanes artificielles; l'extrait de ce mémoire se trouve

dans le XV.e tome des *Annales de chimie et de physique de 1820*, page 375. Après avoir parlé de l'origine des trass et des pouzzolanes, il y est dit : « Quoi » qu'il en soit, au surplus, de la formation de ces » matières, il est maintenant démontré que tout le » mystère de leur propriété réside, non dans la pré- » sence du fer *ou de la chaux*, mais bien dans un » état particulier de combinaison de la silice et de » l'alumine, état auquel on ramène avec la plus » grande facilité toutes les argiles douces et grasses » au toucher, par l'effet d'une légère cuisson. »

On voit que M. Vicat et ceux qui l'ont précédé n'ont attribué aucune influence à la chaux dans la fabrication des trass ou pouzzolanes artificiels. Les expériences qui suivent font connaître, au contraire, que tout le mystère de cette fabrication réside dans le degré de calcination qu'il faut faire subir aux argiles, suivant la quantité de carbonate de chaux qu'elles contiennent. Les argiles, qui contiennent à-peu-près autant d'alumine que de silice, et qui ne contiennent que de trois à cinq centièmes de chaux, ont donné, lorsqu'on les faisait calciner au degré de chaleur nécessaire pour cuire les briques, des résultats souvent supérieurs à ceux des trass et des pouzzolanes naturels. Plus il y a de chaux dans les argiles, moins il faut les calciner; lorsqu'elles ne contiennent point de chaux, il faut un plus grand degré de chaleur : dans ce dernier cas, les mortiers qui en proviennent peuvent offrir la même résistance que ceux qu'on composerait avec le trass naturel; mais le durcissement est toujours beaucoup plus lent que lorsqu'il se trouve de trois à cinq centièmes de chaux dans les argiles

qu'on emploie. Ces résultats se trouvent consignés dans le mémoire que le colonel Treussart a adressé au comité des fortifications en 1822, et dont on trouve un extrait dans le *Moniteur* du 22 janvier 1823.

Les expériences qui suivent font voir que d'autres alcalis jouent aussi un rôle dans la propriété des trass et des pouzzolanes; mais on ne connaît pas encore le degré d'influence qu'ils excercent. On va rapporter succinctement la marche qui a été suivie dans ces expériences, et les principaux résultats auxquels on est parvenu.

L'examen de plusieurs morceaux de trass et de pouzzolane a porté l'auteur à penser que ces produits n'étaient autre chose que des bancs d'argile d'une composition particulière, qui avaient été recouverts et calcinés par la lave des volcans. En faisant fortement calciner du trass ou de la pouzzolane dans un fourneau à réverbère, ces substances se sont vitrifiées et elles ont perdu leurs propriétés hydrauliques; on en a conclu qu'elles n'avaient point reçu un coup de feu très-violent.

On a pris exactement les mêmes substances qui sont contenues dans les trass et dans les pouzzolanes, d'après l'analyse ci-dessus; on en a fait, avec de l'eau, une pâte qu'on a chauffée dans un fourneau à réverbère, en tenant les creusets constamment au rouge pendant six heures : on a obtenu un trass et une pouzzolane artificiels aussi bons que ces produits naturels. Il est à remarquer que la pouzzolane artificielle s'est trouvée supérieure au trass artificiel.

On a pris dans une tuilerie du ciment de briques et du ciment de tuiles peu cuits; on en a également pris de bien cuits, et l'on en a fait du mortier avec de la chaux commune. Les mortiers faits avec les briques et les tuiles peu cuites ont durci très-promptement et ont présenté des résistances doubles de celles des mortiers faits avec les cimens des mêmes substances bien cuites; dans ce dernier cas le durcissement a été très-lent. En chauffant pendant six heures dans un fourneau à réverbère, ces cimens ont perdu toute leur propriété hydraulique.

On a pris des cimens d'une autre tuilerie, et l'on a obtenu des mortiers beaucoup meilleurs avec ceux qui étaient très-cuits. En chauffant ces cimens dans un fourneau à réverbère pendant une demi-heure, pendant une heure et pendant deux heures, on a successivement augmenté leur propriété hydraulique, tandis qu'en chauffant les premiers cimens on n'a obtenu aucun résultat.

On a répété ces expériences sur un grand nombre de cimens faits avec des terres différentes, et l'on a obtenu les résultats les plus opposés. En examinant la composition de ces cimens, l'auteur a reconnu que tous ceux qui contenaient environ un dixième ou une plus grande quantité de carbonate de chaux, donnaient des trass factices lorsqu'ils étaient peu calcinés, et perdaient cette propriété lorsqu'ils l'étaient beaucoup; tandis que les cimens qui ne contenaient point de chaux ou qui n'en contenaient que très-peu, n'acquéraient cette propriété qu'après une forte calcination. D'autres expériences ont confirmé ce résultat; car, en prenant des terres argileuses qui ne contenaient

presque point de chaux, et qui avaient besoin d'être fortement calcinées pour donner des trass factices, elles ont perdu toutes leurs propriétés lorsqu'on leur a fait éprouver le même degré de chaleur après les avoir mêlées avec un dixième ou une quantité plus considérable de chaux. On s'est assuré qu'en faisant chauffer fortement deux terres argileuses contenant les mêmes quantités de silice et d'alumine, et dont l'une avait plus d'un dixième de chaux, tandis que l'autre n'en avait point, celle qui avait de la chaux a perdu ses propriétés de trass avant que celle qui n'en contenait point eût pu acquérir cette propriété. L'auteur conclut de ces faits, que ceux qui ont obtenu de bons résultats avec des terres peu calcinées, se sont servis d'argiles qui contenaient plus d'un dixième de carbonate de chaux ; et que ceux qui ont prétendu qu'on devait les chauffer fortement, ont fait leurs expériences avec des terres qui n'en contenaient presque pas. La présence de la chaux est donc le premier point dont on doit s'assurer dans les terres argileuses qu'on veut employer pour faire des trass ou pouzzolanes factices. Plusieurs expériences portent à croire que quatre ou cinq centièmes de chaux dans les terres argileuses produisent un effet avantageux, attendu que le durcissement est plus prompt, et qu'on n'a pas besoin d'une aussi grande chaleur pour amener les terres au degré de calcination convenable. On observe que cette petite quantité de chaux est toujours soluble dans l'acide sulfurique. Ainsi, pour s'assurer si une terre doit être peu ou fortement calcinée, on en mettra une petite quantité dans un verre, et l'on y versera un peu d'acide

muriatique étendu d'eau ; puis, après avoir filtré ou décanté la liqueur, on y versera un peu d'acide sulfurique : s'il y a un précipité blanc, qui est du sulfate de chaux, le degré de calcination doit être d'autant plus faible, que le précipité est plus abondant; s'il n'y a point de précipité par l'acide sulfurique, les terres peuvent recevoir le degré de chaleur nécessaire pour bien cuire les briques. Ces terres peuvent contenir, comme on l'a dit, quatre ou cinq centièmes de chaux sans qu'il y ait de précipité par l'acide sulfurique; dans ce cas, on peut reconnaître la présence de la chaux en versant un peu d'oxalate d'ammoniaque sur le muriate de chaux.

On a fait plusieurs expériences pour connaître la quantité de chaux qu'il était le plus convenable d'avoir dans les terres argileuses pour obtenir de bons trass factices, en calcinant ces terres au même degré de chaleur que les briques; mais ces mortiers ne sont point encore rompus.

Il est facile d'expliquer l'effet de la chaux dans les terres argileuses, attendu que la silice, l'alumine et une certaine quantité de chaux se vitrifient facilement à un degré de chaleur peu considérable, et qu'aucune substance vitrifiée n'a donné à l'auteur de bons résultats avec la chaux.

Après avoir reconnu l'influence de la chaux, on a examiné celle du fer. A cet effet, on a pris de la terre très-blanche et très-alumineuse, qu'on a fait calciner, et l'on a obtenu un très-bon trass factice; on a ajouté de l'oxide de fer à cette terre, et l'on n'a point obtenu de résultat différent. Le fer paraît

donc jouer le moindre rôle dans la confection des trass ou des pouzzolanes factices.

On a enfin examiné l'influence de la silice. A cet effet, on a pris de la terre blanche très-alumineuse, qu'on fait venir des environs de Cologne pour faire les poteries blanches et les pipes fines. On a lavé cette terre plusieurs fois à grande eau, pour la débarrasser, par la décantation, du peu de silice qu'elle contient. Après cette opération, on a reconnu que cette terre était de l'alumine presque pure. On l'a fait calciner seule, puis on y a ajouté successivement un, deux, trois, quatre et cinq dixièmes de sable blanc bien broyé; on en a fait une pâte avec de l'eau, et l'on a fait calciner ces mélanges au même degré de chaleur. Il est résulté de ces expériences, que la terre alumineuse seule a donné un bon trass ou pouzzolane factice; mais que le résultat a été meilleur avec quatre dixièmes de sable contre six dixièmes de terre alumineuse. Il est à remarquer que ce sont à peu de chose près les proportions de sable et d'alumine qui existent dans la pouzzolane. C'est sans doute à cette circonstance que la pouzzolane doit sa supériorité sur les trass, qui contiennent plus de silice que d'alumine.

On a fait les mêmes expériences avec les mêmes substances, sans y ajouter d'eau pour en faire une pâte; on a trouvé des résultats beaucoup moins avantageux. Il paraît donc que l'eau joue un rôle dans l'action que la silice exerce sur l'alumine par la calcination.

On doit conclure des expériences ci-dessus, que les terres argileuses les plus propres à la fabrication des trass ou des pouzzolanes factices sont celles qui contiennent à peu près autant de sable

que d'alumine, et qui ne contiennent que quelques centièmes de carbonate de chaux; ces sortes de terres se trouvent fréquemment parmi celles qu'emploient les potiers. Les terres blanches très-alumineuses dont on fait les pipes fines, sont aussi très-propres à la fabrication des trass factices. En mélangeant les terres très-grasses avec celles qui sont trop maigres, et celles qui ont trop de chaux avec celles qui n'en contiennent que très-peu, on peut facilement amener les terres argileuses à peu près aux proportions indiquées.

Pour fabriquer les trass ou les pouzzolanes factices, l'auteur propose de corroyer les terres avec de l'eau, de la même manière qu'on le fait pour les briques. Si l'argile qu'on emploie contient plus d'un dixième de carbonate de chaux, on en fera de grosses briques, qu'on placera dans l'endroit où l'on met ordinairement les tuiles, qui sont exposées à un degré de chaleur moins grand que les briques. Si l'argile ne contient presque point de chaux, on en fera des briques de petit échantillon, et on les placera dans l'endroit où l'on fait cuire les briques. En variant la grosseur des briques, et en les plaçant dans un endroit où elles reçoivent plus ou moins de chaleur, on peut toujours se servir des fours à briques pour la fabrication des trass factices.

Lorsque les terres argileuses contiennent plus d'un dixième de carbonate de chaux, elles peuvent donner d'assez bons trass factices, si elles ne reçoivent que le degré de chaleur convenable ; mais si elles reçoivent un peu plus de chaleur qu'il ne faut, elles perdent de suite une grande partie de leurs propriétés, tandis que les terres argileuses qui ne contiennent

que très-peu de carbonate de chaux, peuvent supporter un coup de feu plus grand qu'il n'est nécessaire, sans rien perdre de leur propriété hydraulique. Les briques réfractaires de Sufflenheim ne contiennent presque point de chaux, et donnent de très-bons trass factices. Ces briques sont employées dans la fonderie de canons de Strasbourg. On a pris de ces briques qui avaient été pendant long-temps dans le fourneau, et qui avaient supporté à diverses reprises un haut degré de chaleur ; on a reconnu qu'elles donnaient un ciment qui n'avait nullement perdu de sa propriété hydraulique.

Lorsque les briques ont été calcinées au degré convenable, il faut les broyer très-fin et les passer à travers un tamis de fil métallique très-serré : plus le trass est fin, mieux il vaut.

Les terres argileuses des environs de Strasbourg qui ont donné les meilleurs trass factices, sont, la terre de Sufflenheim, dont on fait les briques réfractaires ; celle du village de Rittsels, près Weissembourg ; la terre argileuse des environs d'Haguenau, qui est connue sous le nom de *Rintzel*. La terre grasse de Holzheim, la seule qui ait donné un assez bon résultat pour la fabrication des chaux hydrauliques artificielles, a aussi donné de bons trass factices. Les terres ci-dessus ne contiennent presque point de chaux. Les briques d'Achenheim, qui contiennent une assez grande quantité de carbonate de chaux, sont généralement peu cuites et donnent un assez bon trass factice (1).

(1) On a fait beaucoup d'essais avec différens cimens ; il n'y

On a aussi obtenu de bons trass factices avec les ardoises qu'on fait venir des environs de Mayence.

Le meilleur trass factice que l'on ait obtenu, provient d'une terre que l'on fait venir des environs de Francfort à Strasbourg pour y faire de l'alun. Cette terre est très-noire avant d'être calcinée ; à mesure qu'on la chauffe, elle devient successivement d'un bleu plus ou moins foncé, puis d'un bleu ciel ; enfin, lorsqu'elle est fortement calcinée, elle est parfaitement blanche : ce n'est que dans cet état qu'elle acquiert la propriété du trass. Cette terre contient une assez grande quantité de sable ; elle ne contient presque point de fer ni de chaux. La couleur de cette terre a fait penser à l'auteur qu'elle contenait des débris de végétaux propres à donner de la potasse ou de la soude par la calcination, et que c'était pour cette raison qu'elle donnait un résultat supérieur aux autres terres, et même à la pouzzolane. Pour vérifier

---

a que le ciment provenant des briques de Sufflenheim qui, ne contenant point de chaux, ait communiqué aux mortiers, lorsqu'il provenait de briques fortement cuites, une résistance égale à celle des mortiers faits avec des trass naturels ; mais le durcissement a été beaucoup plus lent. Tous les autres ciments ont donné des résultats très-inférieurs ; on pourrait cependant s'en servir pour des ouvrages peu importans. Les ciments qui ont donné des résultats médiocres lorsqu'on les a employés dans l'eau, ont aussi donné des résultats semblables lorsqu'on les a employés à l'air. Le moyen le plus prompt et le plus facile de savoir si un ciment que l'on veut employer à l'air avec de la chaux quelconque donnera un bon mortier, serait d'en faire l'essai avec de la chaux commune, dans l'eau, et d'examiner si le durcissement est prompt. Si, en prenant une partie de chaux commune mesurée en pâte, et en y ajoutant deux parties de ciment, le durcissement a lieu dans l'eau dans l'espace de cinq à six jours, on peut être certain que le mortier provenant de ce mélange sera aussi très-bon pour les constructions à l'air.

cette conjecture, on a mêlé un peu de lessive de cendres avec de la terre blanche très-alumineuse que l'on a fait calciner : on a obtenu un meilleur résultat. On a ensuite augmenté la quantité de potasse, et l'on a fait des expériences semblables avec de la soude; mais ces mortiers ne sont point encore rompus.

Les grands travaux qu'on a faits à Cherbourg, ont exigé pour plusieurs millions de trass et de pouzzolane, qu'on a fait venir à grands frais des bords du Rhin et de Naples. Pendant la guerre de 1808, le mètre cube de pouzzolane est revenu, à Cherbourg, à plus de 400 francs. D'après les expériences ci-dessus, on pense que l'on peut faire par-tout du trass artificiel, supérieur à ce produit naturel, au prix de 25 à 30 francs le mètre cube, ce qui affranchira la France du tribut qu'elle paie aux étrangers pour cet objet. Les chaux communes donnent, comme les chaux hydrauliques, un meilleur résultat lorsqu'on emploie du sable et du trass au lieu du trass seul, ce qui offre une grande économie.

L'auteur a présenté onze tableaux d'expériences à l'appui des faits qu'on vient de rapporter. On va réunir, dans le seul tableau suivant, les principaux résultats qu'ils contiennent.

N.os des mortiers.	COMPOSITION DES MORTIERS.	POIDS qu'ils ont supporté avant de se rompre.
	Briques communes de Strasbourg, taillées de la même dimension que les mortiers et rompues de la même manière, pour leur servir de terme de comparaison.....	210 kil.
	Mortiers de chaux hydraulique naturelle et de chaux commune avec du trass et de la pouzzolane.	
1.	Une partie de chaux d'Obernai éteinte en poudre, et deux parties de sable...	De 55 à 192.
2.	Une partie de chaux *idem*, une de sable et une de trass.....	De 150 à 241
3.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de trass.....	De 115 à 159.
4.	Une partie de chaux *idem*, une de sable et une de pouzzolane.....	213.
5.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de pouzzolane.....	198.
6.	Une partie de chaux de Metz éteinte en poudre, et une et demie de sable....	De 53 à 142.
7.	Une partie de chaux *idem*, une de sable et une de trass.....	De 150 à 212.
8.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de trass.....	200.
9.	Une partie de chaux commune éteinte en poudre, une de sable et une de trass.	De 135 à 192.
10.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de trass.....	De 105 à 119.
11.	Une partie de chaux *idem*, une de sable et une de pouzzolane.....	227.

N.os des mortiers.	COMPOSITION DES MORTIERS.	POIDS qu'ils ont supporté avant de se rompre.
12.	Une partie de chaux commune, et deux parties de pouzzolane.....	211 kil.
13.	Galets de Boulogne, seuls.....	De 49 à 72.
14.	Un mortier de galets de Boulogne, seuls, très-fortement calcinés, et laissés à l'air pendant vingt jours, sans les éteindre, avant d'en faire du mortier.....	130.
15.	Galets de Boulogne et une demi-partie de sable.....	17.
16.	Galets de Boulogne et une dem-partie de trass.....	8.
	Mortiers de chaux hydrauliques factices.	
17.	Une partie de chaux commune en pâte, qui a été recuite au four à chaux, en y mélangeant 0.2 de sable blanc broyé très-fin, et dont on a ensuite fait du mortier avec deux parties de sable...	16.
18.	Une partie de chaux commune en pâte, qui a été recuite au four à chaux avec 0.2 de terre blanche très-alumineuse, et dont on a ensuite fait du mortier avec deux parties de sable...	De 20 à 60.
19.	Une partie de chaux commune en pâte, qui a été recuite au four à chaux avec 0.2 d'ocre jaune, et dont on a ensuite fait du mortier avec deux parties de sable.....	De 10 à 41.
20.	Une partie de chaux commune en pâte, qui a été recuite au four à chaux avec 0.2. d'ocre rouge, et dont on a ensuite fait du mortier avec deux parties de sable.....	De 16 à 20.

N.os des mortiers.	COMPOSITION DES MORTIERS.	POIDS qu'ils ont supporté avant de se rompre.
21.	Une partie de chaux commune en pâte, qui a été recuite au four à chaux avec 0.1 d'argile de Holsheim, et dont on a ensuite fait du mortier avec deux parties de sable.....	48 kil.
22.	Une partie de chaux commune en pâte, qui a été recuite au four à chaux avec 0.2 d'argile de Holsheim, et dont on a ensuite fait du mortier avec deux parties de sable.....	De 85 à 98.
23.	Une partie de chaux commune en pâte, qui a été recuite au four à chaux avec 0.3 d'argile de Holsheim, et dont on a fait du mortier avec deux parties de sable.....	0 (sans consistance).
	Nota. On a fait des expériences semblables avec les argiles dont on fait les briques dans les environs de Strasbourg, et l'on n'a obtenu aucun résultat.	
24.	Une partie de chaux commune en pâte, qui a été recuite au four à chaux avec 0.20 de la même terre blanche que le n.° 18, à laquelle on a ajouté un peu d'eau chargée de carbonate de soude à 5°, et dont on a ensuite fait du mortier avec deux parties de sable.....	76.
25.	Une partie de chaux commune en pâte, qui a été recuite au four à chaux avec 0.2 de la même terre blanche que le n.° 18, à laquelle on a ajouté un peu d'eau chargée de soude pure à 5°, et dont on a ensuite fait du mortier avec deux parties de sable.....	137.
	Nota. Depuis l'envoi des expériences ci-dessus, l'auteur a rompu des mortiers faits	

N.os des mortiers.	COMPOSITION DES MORTIERS.	POIDS qu'ils ont supporté avant de se rompre.
	avec de la chaux hydraulique factice fabriquée à Paris, par M. de *Saint-Léger*, d'après le procédé de M. Vicat. Cette chaux a été mise dans des bouteilles bien cachetées à sa sortie du four, pour être envoyée à Strasbourg; voici les résultats obtenus. Une partie de cette chaux, réduite en pâte aussitôt après son arrivée et mise dans l'eau sans rien y ajouter, s'est rompue au bout d'un an sous le poids de quatre-vingt-cinq kilogrammes. La chaux d'Obernai et celle de Verdi, traitées de la même manière, supportent jusqu'à deux cent vingt kilogrammes avant de se rompre. Un mortier fait immédiatement avec une partie de cette chaux et deux parties de sable a supporté cent quinze kilogrammes avant de se rompre. Un second mortier, fait dans les mêmes proportions et avec la même chaux qu'on avait éteinte en poudre en y versant le cinquième de son volume d'eau, et qu'on avait laissée à l'air pendant un mois, s'est rompu sous le poids de cinquante-cinq kilogrammes. Un troisième mortier, fait de la même manière avec la même chaux, qu'on a laissée s'éteindre d'elle-même à l'air, n'a plus supporté qu'un poids de vingt-cinq kilogrammes avant de se rompre. Enfin, cette chaux, après deux mois d'extinction, soit en poudre, soit à l'air, n'a plus donné (*comme toutes les chaux hydrauliques naturelles qu'on a employées*) que des mortiers très-peu hydrauliques, et qui se broyaient avec les doigts. Avec de la chaux commune et du trass factice, on n'a pas à craindre le même inconvénient; cette chaux donne encore de très-bons résultats long-temps après son extinction en poudre, et la résistance des mortiers est beaucoup plus grande.	
	Mortiers de chaux communes et de trass ou pouzzolanes factices.	
26.	Une partie de chaux commune éteinte	

N.os des mortiers.	COMPOSITION DES MORTIERS.	POIDS qu'ils ont supporté avant de se rompre.
	en poudre, et deux parties de ciment de briques de Strasbourg peu cuites...	150 kil.
27.	Une partie de chaux commune éteinte en poudre, et deux parties des mêmes briques bien cuites.....	82
28.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de ciment de tuilots peu cuits....	125.
29.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties des mêmes tuilots bien cuits.....	87.
30.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties du même ciment que le n.° 26, qu'on a fait chauffer pendant six heures, en tenant le creuset à un rouge tendre.....	0 (sans consistance).
31.	Une partie de chaux commune éteinte en poudre, et deux parties de ciment de briques bien cuites, d'une autre tuilerie que les numéros précédens...	65.
32.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de ciment du n.° 31, recuit pendant une demi-heure, en tenant le creuset à un rouge tendre	80.
33.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de ciment du n.° 31, recuit à un rouge tendre pendant une heure.....	128.
34.	Une partie de chaux *idem*, et deux partie de ciment du n.° 31, recuit à un rouge tendre pendant deux heures....	145.
35.	Une partie de chaux commune et deux parties de terre de Holzheim, calcinée pendant douze heures dans un fourneau à réverbère, en tenant le creuset à un rouge tendre.....	145.

N.os des mortiers.	COMPOSITION DES MORTIERS.	POIDS qu'ils ont supporté avant de se rompre.
36.	Une partie de chaux commune, et deux parties de la même terre que le n.° 35, calcinée pendant le même temps, après avoir été mélangée avec o.1 de chaux.	77 kil.
	Nota. Le trass factice du n.° 35, avec la chaux d'Obernai, a donné un mortier qui a supporté deux cents kilogrammes: tandis que celui du n.° 36, avec la même chaux, s'est rompu sous le poids de quatre-vingt-dix-huit kilogrammes.	
37.	Une partie de chaux commune en poudre, et deux parties de terre blanche très-alumineuse des environs de Cologne, qui a été calcinée dans un fourneau à réverbère, en tenant les creusets à un rouge tendre pendant six heures.....	190.
38.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de la même terre que ci-dessus, qui a été calcinée de la même manière, après l'avoir mélangée avec o.1 de sable blanc broyé.....	170.
39.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de la même terre que le n.° 37, qui a été calcinée de la même manière, après avoir été mélangée avec o.2 de sable blanc broyé.....	172.
40.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de la même terre que le n.° 37, qui a été calcinée de la même manière, après avoir été mélangée avec o.3 de sable broyé.....	174.
41.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de la même terre que le n.° 37, qui	

N.os des mortiers.	COMPOSITION DES MORTIERS.	POIDS qu'ils ont supporté avant de se rompre.
	a été calcinée de la même manière, après avoir été mélangée avec 0.4 de sable blanc broyé.....	215 kil.
42.	Une partie de chaux commune en poudre, et deux parties de la même terre que le n.° 37, qui a été calcinée de la même manière, après avoir été mélangée avec 0.5 de sable blanc broyé.....	210.
43.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de la même terre que le n.° 37, qui a été calcinée avec les briques dans le four à chaux.....	203.
44.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de la même terre que le numéro précédent, qui a été calcinée en même temps avec les briques dans le four à chaux, après l'avoir humectée avec le quart de son volume d'eau chargée de lessive de cendres à 5°.....	220.
45.	Une partie de chaux commune éteinte en poudre, et deux parties de trass factice fait avec des ardoises provenant des environs de Mayence, et qu'on a fait calciner dans un fourneau à réverbère, en tenant le creuset à un rouge tendre pendant dix heures.....	205.
46.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de ciment de briques réfractaires de Sufflenheim.....	222.
47.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de terre à pipe provenant des environs de Weissembourg, et qui a été calcinée dans le four à chaux avec les briques.....	210.

N.os des mortiers.	COMPOSITION DES MORTIERS.	POIDS qu'ils ont supporté avant de se rompre.
48.	Une partie de chaux commune éteinte en poudre, et deux parties de terre argileuse des environs de Haguenau, connue sous le nom de *rintzel*, et qui a été calcinée dans le four à chaux avec les briques.....	160 kil.
49.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de la même terre que le numéro précédent, qui a été calcinée de la même maniere, après avoir été séparée par le lavage d'une partie du sable qu'elle contient, et qui la rend un peu maigre.....	190.
50.	Une partie de chaux *idem*, et deux parties de terre argileuse provenant des environs de Francfort, et dont on fait de l'alun à Strasbourg : cette terre, qui est noirâtre, a été calcinée au four à chaux jusqu'à ce qu'elle soit devenue blanche; dans cet état, les résultats ont varié de.....	192 à 263.

Observations sur le tableau ci-dessus.

On n'a point mis dans ce tableau de colonne pour faire connaître la durée du durcissement, attendu qu'on pourrait en tirer de fausses conséquences. On va indiquer d'une manière générale les résultats des expériences ci-dessus à cet égard, en commençant par la première partie du tableau, qui est relative aux chaux hydrauliques naturelles.

L'auteur dit qu'un mortier est dur lorsqu'en le

pressant fortement avec le pouce on n'y fait aucune impression. On a eu occasion d'observer que le durcissement était plus prompt en été qu'en hiver. Les expériences rapportées dans le tableau ci-dessus ont été faites dans différentes saisons et avec des chaux qu'on a laissées plus ou moins long-temps exposées à l'air après les avoir éteintes avec un peu d'eau.

Les mortiers faits avec les chaux d'Obernai et du sable durcissent généralement dans l'espace de dix à douze jours. Les mortiers semblables, faits avec la chaux de Metz, restent ordinairement quinze jours avant de durcir.

Les mortiers des chaux d'Obernai et de Metz, faits avec du sable et du trass, ont généralement durci dans le même temps et dans l'espace de quatre à cinq jours : avec la pouzzolane, le durcissement a généralement eu lieu un jour plus tôt.

Les galets de Boulogne du n.° 13 ont généralement durci dans l'espace de vingt-quatre heures; mais le résultat a été faible : le n.° 15, qui a donné un résultat assez bon, a mis douze jours à durcir.

Si l'on compare le n.° 1 du tableau ci-dessus avec le n.° 6, on est porté à croire que les chaux d'Obernai sont de beaucoup supérieures aux chaux de Metz; mais, sur plusieurs expériences, il n'y en a qu'une seule qui ait donné le résultat 192 ; les autres mortiers n'ont donné que des résultats qui ont varié entre quatre-vingts et cent et quelques kilogrammes : en prenant la moyenne de dix expériences faites avec les mortiers de chaux d'Obernai et de Metz, dans les-

quels on n'a mis que du sable, on trouve que le résultat moyen serait que ces mortiers se rompent sous le poids de quatre-vingt-dix kilogrammes. Sur vingt-cinq expériences faites avec de la chaux d'Obernai, du sable et du trass, le terme moyen est un mortier qui supporterait un poids de cent quatre-vingts kilogrammes avant de se rompre. On obtient, à peu de chose près, le même résultat en prenant la moyenne des expériences qui ont été faites avec la chaux de Metz, du sable et du trass. Ainsi l'on double la résistance des mortiers faits avec les chaux d'Obernai et de Metz en y ajoutant une partie de trass. Le terme moyen des expériences faites avec les mêmes chaux et du trass seulement est moindre que celui des mêmes mortiers faits avec partie égale de sable et de trass.

Les grandes variations qu'on a obtenues avec les chaux hydrauliques naturelles, paraissent tenir aux causes suivantes : 1.° toutes les pierres à chaux d'une même carrière ne paraissent point avoir les mêmes propriétés hydrauliques ; 2.° le degré de cuisson influe beaucoup sur la propriété de la chaux, et dans une fournée, il y a nécessairement des parties qui sont beaucoup plus calcinées que les autres ; 3.° il y a des chaux hydrauliques qui demandent à être employées peu d'heures après leur extinction ; d'autres gagnent à être laissées à l'air pendant une vingtaine de jours après avoir été éteintes en poudre sèche avec le cinquième de leur volume d'eau. Quelques chaux perdent une grande partie de leurs propriétés hydrauliques si on les laisse s'éteindre d'elles-mêmes à l'air pendant une vingtaine de jours ;

d'autres, au contraire, se conservent plus long-temps de cette manière, que si on les éteint avec un peu d'eau.

L'emploi du trass corrige en grande partie les inconvéniens dont on vient de parler. De la chaux de Metz qui avait perdu presque toute sa propriété hydraulique par une trop longue exposition à l'air, au point de donner des mortiers qui se sont rompus sous le faible poids de quarante kilogrammes, lorsqu'il n'y avait que du sable, a donné des mortiers qui ont supporté un poids de deux cents kilogrammes, lorsqu'on les a faits avec une partie de chaux une de sable et une de trass. Les mortiers de chaux d'Obernai ont produit des résultats semblables. On voit donc qu'il est très-important, lorsqu'on fait usage de chaux hydrauliques naturelles, de s'assurer par des expériences de la manière dont il convient de les employer; on pense que dans des travaux importans il n'est pas prudent d'employer ces sortes de chaux sans un peu de trass.

Plusieurs expériences ont fait connaître que différens morceaux de trass n'ont pas les mêmes propriétés. On a trouvé que divers morceaux de trass et de la même chaux donnaient des différences de près de moitié. Ce résultat n'est pas étonnant, attendu que ces différens morceaux de trass doivent avoir reçu des degrés de chaleur bien différens; les uns doivent avoir été trop calcinés, et les autres trop peu. Sous ce rapport, les trass factices sont préférables aux trass naturels, attendu qu'on est le maître de leur donner le degré de calcination convenable.

Les mortiers n.os 9, 10, 11 et 12 du tableau ci-dessus, font voir combien on serait induit en erreur si l'on admettait l'assertion de M. Gauthey, que les chaux communes ne durcissent point dans l'eau lorsqu'on fait les mortiers avec du trass ou de la pouzzolane.

Le n.° 9 est le résultat de dix expériences, qui ont varié entre cent trente-cinq et cent quatre-vingt-douze kilogrammes; le terme moyen de ces dix expériences est cent quatre-vingts kilogrammes; le terme moyen du n.° 10 est également cent quatre-vingts kilogrammes : ainsi, sous le rapport de l'économie, il est beaucoup plus avantageux, lorsqu'on emploie les chaux communes, de faire le mortier avec du sable et du trass, par parties égales, qu'avec du trass seulement. Les n.os 11 et 12 font voir que la pouzzolane donne des résultats un peu supérieurs à ceux qu'on obtient de l'emploi du trass, et qu'il est également préférable d'employer autant de sable que de pouzzolane.

Ces mortiers ont généralement durci dans l'espace de quatre à cinq jours; quelques-uns ont mis plus de temps.

On s'est convaincu que les différences qu'on a eues dans les expériences n.os 9 et 10, sont dues en grande partie aux divers trass qu'on a employés; il est possible aussi qu'une partie de ces différences provienne de ce que ces mortiers ont été faits avec des chaux qu'on a laissées plus ou moins long-temps à l'air après leur extinction. Lorsqu'on a reconnu que l'hydrate de chaux absorbait de l'oxigène, on a fait du mortier avec du sable,

du trass et de la chaux commune, employés immédiatement après l'extinction, et à différentes époques après l'extinction; mais ces mortiers ne sont point encore rompus.

La seconde partie du tableau est relative aux chaux hydrauliques factices. On voit que la silice et la terre blanche très-alumineuse donnent à la chaux commune la propriété d'être hydraulique; mais ces résultats sont très-faibles. Les argiles dont on fait les briques et les tuiles aux environs de Strasbourg, n'ont produit aucun bon résultat. La terre argileuse de Holzheim a donné seule un assez bon résultat, lorsqu'on l'a employée dans la proportion de 0.2 contre une partie de chaux en pâte; il est étonnant qu'avec 0.3 on n'ait plus obtenu aucun résultat.

Les mortiers n.os 19, 20 et 22, ont mis plus d'un mois à durcir dans l'eau, et ont donné les plus faibles résultats qui soient marqués dans la colonne, lorsqu'ils ont été faits aussitôt après leur sortie du four; ils ont durci dans l'espace de dix jours et ont donné les résultats les plus forts lorsqu'on n'a fait les mortiers qu'après avoir éteint ces chaux avec le cinquième de leur volume d'eau, et les avoir laissées, dans cet état exposées à l'air, pendant dix jours.

Le n.° 25, qui est fait de la même manière que le n.° 18, en ajoutant une très-petite quantité d'eau chargée de soude à 5°, a donné un résultat beaucoup meilleur : le durcissement a été complet dans l'espace de huit jours. On a fait de nouvelles expériences en augmentant graduellement la proportion de la soude; mais ces mortiers ne sont point encore

rompus. Les mortiers semblables dans lesquels on a fait entrer un peu de potasse, ne sont pas non plus rompus encore.

L'auteur a eu occasion de remarquer, en faisant ces expériences, que la bonté de ces sortes de mortiers dépend beaucoup de l'exactitude du mélange de l'argile, et qu'on éprouve de grandes difficultés à faire ce mélange exactement : le moyen qui lui a le mieux réussi, a été de délayer l'argile dans une grande quantité d'eau et de la verser sur la chaux qu'on voulait réduire en pâte pour la faire calciner une seconde fois; de cette manière, l'argile se trouve mieux divisée dans la chaux.

On a observé que ces sortes de chaux perdent une partie de leurs propriétés lorsqu'elles sont trop fortement calcinées; elles perdent également presque toutes leurs propriétés hydrauliques par une trop longue exposition à l'air. Les chaux hydrauliques factices qui ont été faites de cette manière à Strasbourg, ont acquis plus de propriété hydraulique lorsqu'on les a laissées pendant quelques jours à l'air après leur extinction, avant d'en faire du mortier.

On a eu lieu de remarquer que toutes les chaux hydrauliques naturelles qui avaient perdu leur propriété par une trop longue exposition à l'air, ne donnaient plus également aucun résultat lorsqu'on en faisait des mortiers qu'on exposait à l'air; mais que ces chaux donnaient encore de bons résultats lorsqu'on les mélangeait avec du trass ou de la pouzzolane.

La troisième partie du tableau ci-dessus est relative aux trass ou pouzzolanes factices.

Les n.os 26, 27, 28, 29 et 30, sont des cimens de briques et de tuiles faites avec les mêmes terres; ces cimens donnent un précipité de chaux abondant, en les traitant par les acides muriatique et sulfurique. Le n.° 26 a mis onze jours à durcir, et le n.° 28 n'en a mis que cinq; les n.os 27 et 29 ne sont devenus durs qu'au bout de deux mois. Le n.° 30, fait avec le même ciment que le n.° 26, qui a été recuit pendant six heures, était, au bout d'un an, aussi mou que lorsqu'il avait été mis dans l'eau.

Les n.os 31, 32, 33 et 34, sont faits avec d'autres cimens que les numéros précédens; on n'y a trouvé aucune trace de chaux en les traitant par l'acide muriatique et par l'oxalate d'ammoniaque; ils contiennent beaucoup de sable. On voit que ces cimens donnent de meilleurs résultats à mesure qu'on les calcine davantage; ils présentent donc des résultats entièrement opposés à ceux des numéros précédens. Le durcissement a été de dix à douze jours pour le n.° 31; il a été plus long pour les numéros suivans; enfin, le n.° 34, qui a donné le meilleur résultat, n'a durci qu'au bout de vingt jours.

Les expériences ci-dessus ont été répétées plusieurs fois, et l'on a toujours obtenu des résultats semblables; c'est-à-dire que les cimens qui contiennent une assez grande quantité de chaux, perdent presque toute leur propriété de trass s'ils sont trop cuits, et que ceux qui n'en contiennent point n'acquièrent cette propriété qu'au degré de chaleur qui la fait perdre aux cimens qui contiennent une certaine quantité de chaux. Plusieurs expériences ont

fait connaître que lorsque les terres contenaient un dixième de carbonate de chaux, elles perdaient promptement leurs propriétés hydrauliques : les n.os 35 et 36 ne laissent aucun doute à cet égard ; cette expérience a été répétée sur plusieurs autres terres. D'un autre côté, plusieurs expériences ont démontré que quand les terres argileuses contenaient quelques centièmes de chaux seulement, alors le durcissement était plus prompt, sans nuire à la résistance, lorsqu'on calcinait ces terres au degré de chaleur nécessaire pour bien cuire les briques. Ainsi qu'on l'a dit plus haut, on a fait des expériences pour déterminer la petite quantité de chaux qu'il convient d'avoir dans les terres argileuses ; mais ces mortiers ne sont point encore rompus. Des résultats semblables ont été obtenus avec des mortiers exposés à l'air. Ainsi l'on a tort de prescrire d'une manière générale de se servir de cimens *bien cuits* : les cimens doivent avoir un degré de cuisson proportionné à la quantité de chaux qu'ils contiennent ; autrement ils peuvent ne donner que de très-mauvais mortiers.

Les mortiers des n.os 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43 et 44, sont faits avec une terre très-blanche et très-alumineuse, qu'on tire des environs de Cologne. Cette terre a été lavée plusieurs fois à grande eau, pour la débarrasser du peu de silice qu'elle contient, et l'on s'est assuré qu'après cette opération elle n'était presque que de l'alumine. En la traitant avec de l'acide muriatique et du prussiate de potasse, on n'a obtenu qu'un bleu de Prusse très-léger : ainsi elle ne contient que quelques atomes de fer. On n'y a trouvé aucune trace de chaux.

Les n.os 37 et 43 prouvent que les terres très-alumineuses donnent de très-bons trass ou pouzzolanes factices, et que le degré de cuisson convenable est celui qui est nécessaire pour bien cuire les briques. Les n.os 38, 39, 40, 41, 42 et 43, font voir qu'une petite quantité de sable diminue la propriété des trass, et que cette propriété est augmentée lorsque le sable et l'alumine sont à peu près en proportions égales.

Le durcissement des mortiers ci-dessus a eu généralement lieu dans l'espace de quinze jours.

La comparaison des n.os 44 et 45 prouve que les trass augmentent de valeur par une légère addition de potasse. On a fait de nouvelles expériences en augmentant la dose de la potasse ; on les a faites également avec la soude : mais ces mortiers ne sont point encore rompus.

Les n.os 45, 46, 47, 48, 49 et 50, sont également différentes terres argileuses, dans lesquelles on n'a trouvé aucune trace de chaux. Le durcissement a généralement eu lieu dans l'espace de dix à douze jours, à l'exception du n.° 50, qui a toujours durci beaucoup plus vîte. Le durcissement est plus prompt avec ce trass factice qu'avec la pouzzolane, et le résultat est également supérieur. L'argile du n.° 50 ne contient également que très-peu de fer. Différentes circonstances ont fait penser que cette terre contenait beaucoup de racines de végétaux, susceptibles de donner des alcalis par la calcination: c'est ce qui a engagé à commencer des expériences en combinant ces substances avec les terres argileuses.

La comparaison des n.os 48 et 49 fait voir qu'on améliore les terres qui sont susceptibles de donner

des trass factices, en les séparant par le lavage d'une partie de leur sable, lorsqu'elles sont trop maigres.

Ces premières expériences ont été faites, il y a deux ans, pour connaître les terres qui étaient susceptibles de donner de bons trass factices : on ne les a point, en conséquence, mêlées avec du sable pour en faire du mortier. Depuis cette époque, on a fait de nouvelles expériences avec ces terres calcinées, et l'on en a fait des mortiers avec de la chaux, du sable et de ces trass. Toutes ces expériences ne sont point encore terminées ; mais celles qui le sont ont fait connaître que les mortiers faits avec chaux, sable et trass factices, sont supérieurs à ceux dans lesquels il n'entre que cette dernière substance, ainsi que cela a lieu pour les trass et les pouzzolanes naturels.

Si l'on compare les résultats obtenus au moyen des trass factices à ceux qu'on a eus avec la chaux commune et deux parties de trass naturel, qui se trouvent dans la première partie du tableau, on verra que les mortiers faits avec les trass factices sont supérieurs à ceux qui sont faits avec le trass naturel.

Si l'on compare les mortiers faits avec la chaux hydraulique artificielle, qui se trouvent dans la seconde partie du tableau, avec les résultats qu'on a obtenus au moyen de la chaux commune et des trass factices, qui se trouvent dans la troisième partie, on verra que les meilleurs mortiers faits avec les chaux hydrauliques artificielles n'ont pas donné la moitié des résultats obtenus par le moyen des trass factices. Il n'y a d'exception que pour le mortier dans lequel on a ajouté un peu de soude à la terre

alumineuse. Il est possible qu'on puisse par ce moyen obtenir des résultats beaucoup plus avantageux, lorsque l'expérience aura fait connaître les proportions convenables.

L'auteur pense que dans l'état actuel de nos connaissances, on ne doit point faire de chaux hydrauliques artificielles, attendu les circonstances suivantes : 1.° elles reviendraient à un prix très-élevé dans les pays où l'on est obligé de faire subir une seconde cuisson à la chaux, et par la difficulté de bien faire en grand le mélange de l'argile; 2.° toutes les terres argileuses ne sont point propres à la confection des chaux hydrauliques artificielles; 3.° ces chaux perdent facilement une grande partie de leurs propriétés hydrauliques par une cuisson un peu trop forte, et par l'action qu'elles exercent sur l'air, qui les ramène en peu de temps à l'état de chaux communes; 4.° enfin les résultats qu'on obtient par ce moyen sont de beaucoup inférieurs à ceux qu'on peut obtenir d'une manière plus facile, au moyen des trass factices. Le résultat moyen des mortiers faits avec les bonnes chaux hydrauliques naturelles et du sable est de moitié inférieur à ceux qui sont faits avec les chaux communes, du sable et du trass factice.

L'auteur fait observer que, lorsqu'il s'agit de constructions dans l'eau, on ne fait des chaux hydrauliques artificielles que pour obtenir des mortiers qui aient la propriété de durcir dans l'eau : puisqu'on obtient ce résultat directement avec la chaux commune et le trass factice, et que le mortier qui en résulte est meilleur, il pense que c'est le moyen qu'il est le plus avantageux d'employer. Les chaux communes

sont à peu près les mêmes par-tout (1), et ne sont point exposées, comme les chaux hydrauliques, à perdre une grande partie de leurs propriétés par une cuisson trop forte, ou par une exposition de peu de jours à l'air, inconvéniens qu'il est difficile d'éviter.

On a eu occasion de vérifier que les mortiers hydrauliques donnent de meilleurs résultats lorsqu'ils sont employés dans l'eau ou dans un endroit humide, que lorsqu'on s'en sert à l'air; cependant, dans ce dernier cas, on obtient toujours un mortier qui est de beaucoup supérieur à celui fait avec la chaux commune (2). Un excès de trituration est tout-à-fait inutile; il suffit que les matières soient bien mélangées, ce qui a lieu lorsqu'elles ont été passées cinq ou six fois au rabot. Les mortiers qui ont été faits de la consistance des mortiers ordinaires, ont donné de

(1) On ne veut point dire que toutes les chaux communes sont les mêmes sous le rapport chimique; mais elles contiennent souvent du fer, du manganèse, &c. sans que leurs propriétés soient sensiblement changées. On a fait des expériences avec un grand nombre de chaux communes de différens pays: elles étaient sans doute différentes sous le rapport de leur composition; mais avec le trass, elles ont produit des mortiers qui différaient peu. Il n'en est pas de même des chaux hydrauliques; lorsqu'on ne les emploie qu'avec du sable, elles produisent souvent des mortiers différens, quoique leur composition soit à peu près la même.

(2) Depuis huit ans, toutes les maçonneries des revêtemens des fortifications de Strasbourg ont été faites avec de la chaux hydraulique, ainsi que les rejointoiemens et plusieurs crépissages; les résultats qu'on a obtenus ont été de beaucoup supérieurs à ceux que l'on avait obtenus avec la chaux commune. Tout le monde connaît d'ailleurs la bonté des maçonneries que l'on fait depuis bien longtemps à Metz avec les chaux hydrauliques de ce pays. L'auteur a commencé des expériences sur les mortiers à l'air; mais elles ne sont point encore terminées.

meilleurs résultats que ceux qui ont été gâchés ferme. Deux espèces différentes, qui n'ont été mises dans l'eau qu'après avoir acquis une demi-fermeté, ont donné de meilleurs résultats que lorsqu'on les a immergées aussitôt après leur confection : on n'a trouvé d'exception que pour les mortiers provenant des galets de Boulogne. Les mortiers auxquels on a laissé prendre une assez forte consistance, et qu'on a rebattus en y ajoutant la quantité d'eau nécessaire pour les ramener à leur premier état, ont acquis une plus forte résistance lorsqu'on les a rebattus dans l'espace de quarante-huit heures.

Les mortiers hydrauliques dont on vient de parler, sont indispensables pour toutes les maçonneries qui sont faites dans l'eau ou dans des lieux humides; ils forment en outre la base des bétons : on appelle ainsi le mélange qu'on fait des mortiers hydrauliques avec de gros graviers, des pierres, ou enfin des briques concassées de la grosseur d'un œuf. Quand le mélange est bien fait, on descend ces matières dans l'eau, et elles forment en peu de temps un massif d'une grande consistance lorsque le mortier hydraulique est bon. On peut, par ce moyen, descendre les fondations d'un ouvrage à une grande profondeur au-dessous des eaux, sans faire aucun épuisement, ce qui présente une grande économie. Les épuisemens sont d'ailleurs impossibles passé une certaine profondeur, qui est assez bornée. Au-delà de cette limite, il est indispensable de fonder en béton.

Les bétons qu'on a faits à Strasbourg, ont été composés de six parties de recoupes de pierres ou de gros gravier sur sept parties de mortiers hydrau-

liques. Lorsque le mélange est fait, on laisse reposer le béton, jusqu'à ce qu'il ait pris une consistance assez forte pour qu'on soit obligé de l'entamer avec la pioche, ce qui a lieu ordinairement au bout de vingt-quatre à trente-six heures; on descend alors le béton dans l'eau, et il se ramollit aussitôt. Au bout de quelques heures, on le comprime légèrement avec une dame plate qui a un long manche : on le laisse dans cet état, et l'on continue à former de nouvelles couches jusqu'au niveau qu'on juge nécessaire d'atteindre pour pouvoir épuiser sans difficulté et commencer les maçonneries ordinaires. Lorsque le béton est bien fait, il a pris assez de consistance pour qu'on puisse commencer les maçonneries ordinaires huit à dix jours après qu'il a été coulé.

On a fait à Strasbourg plusieurs constructions importantes en béton, et entre autres une écluse de chasse à cinq passages dans le fossé du corps de place, qui a trente-quatre mètres de largeur. Pour empêcher les eaux de passer par-dessous le radier, ainsi que cela avait lieu précédemment, on a construit en avant un parafouille, c'est-à-dire, un mur qui est joint au radier, et auquel on a donné $1^{m}.20$ d'épaisseur; on l'a descendu à $3^{m}.70$ en contre-bas du radier, qui lui même se trouve à $1^{m}.60$ au-dessus des eaux moyennes. Il eût été impossible de faire une pareille construction à une profondeur aussi grande par le moyen des épuisemens : on l'a faite en béton sans éprouver de difficultés. Le radier a été fait également en béton, et l'auteur a proposé, en 1819, de couvrir la masse de béton d'une couche de bon mortier hydraulique de $0^{m}.20$ d'épaisseur, afin de former

un radier d'une seule pièce en pierre factice. Ce moyen a été employé avec succès, et a présenté une grande économie, jointe à beaucoup de solidité : la couche de mortier a pris une très-grande dureté, et adhère fortement au béton. L'emploi de ce moyen serait très-avantageux dans les pays où la bonne pierre de taille est rare.

Les principaux faits qu'on vient d'exposer, sont le résultat de près de mille expériences qui ont été faites sur les mortiers hydrauliques depuis trois ans : elles ne sont point, il est vrai, toutes entièrement terminées ; mais il ne reste, comme on le voit, à connaître que les proportions les plus convenables à employer dans quelques cas. On a adressé, à l'appui du mémoire, plusieurs échantillons des principaux mortiers qui ont été rompus, et qui font partie du tableau ci-dessus.

Plusieurs des expériences rapportées dans cet extrait confirment celles que M. Vicat avait faites précédemment ; d'autres leur sont contraires. Cette différence peut provenir en partie de la nature des substances qui ont été employées. Quoi qu'il en soit, l'auteur n'en rend pas moins justice aux utiles travaux de M. Vicat, qui a rendu un grand service à l'art des constructions, en publiant ses recherches sur les mortiers.

On voit par ce qui précède que l'idée principale de l'auteur est qu'il y aurait beaucoup plus d'avantage à faire directement des mortiers hydrauliques avec de la chaux commune et des trass ou de la pouzzolane factices, que de chercher à faire d'abord de la chaux hydraulique pour en composer ensuite les mortiers avec les sables ordinaires. D'autres

ingénieurs ont eu sans doute aussi l'idée de ce moyen; mais n'ayant pas, comme l'auteur, remarqué et déterminé l'influence que la chaux exerce dans la formation des pouzzolanes factices, ils ne lui ont peut-être pas accordé toute la préférence qu'il mérite, soit à cause de l'incertitude où ils ont pu se croire de réussir dans tous les cas à faire de bonnes pouzzolanes artificielles, soit à cause de la difficulté et de la cherté des procédés qui se sont présentés les premiers pour y parvenir.

Quant aux expériences que l'auteur a faites sur l'action que le manganèze, le fer, la silice et l'alumine peuvent exercer dans la formation des chaux hydrauliques, elles ont été déjà publiées dans le *Moniteur* du 22 janvier 1823, et se trouvent conformes aux résultats obtenus et publiés à peu près à la même époque par M. Berthier, ingénieur en chef des mines (*Annales des Mines*, tome VII). Le travail de cet ingénieur contient l'analyse d'un grand nombre de pierres à chaux, et jette un grand jour sur la théorie des mortiers (1).

(1) Aucune recherche n'étant indifférente dans l'état où se trouve encore la théorie des mortiers, on consignera ici l'expérience suivante, qu'on a eu l'occasion de faire depuis l'impression de cet extrait.

On a mis dans une fiole, jusqu'au quart de la hauteur, un mélange composé d'une partie de chaux extraite du marbre blanc, éteinte et réduite en pâte avec de l'eau distillée, et de deux parties d'alumine extraite de l'alun, et qu'on avait calcinée. On a rempli la fiole avec de l'eau distillée, et l'on a bouché hermétiquement. Le mélange ainsi renfermé a durci en très-peu de temps. On a répété la même expérience avec du trass et de la pouzzolane, et l'on a obtenu le même résultat. Ces faits prouvent que l'alumine calcinée seule agit comme pouzzolane, et que le durcissement des mortiers n'est point dû, comme on l'a cru pendant long-temps, à l'absorption de l'acide carbonique enlevé à l'eau ou à l'air.

NOTICE

SUR LES CHAPES DE VOÛTES,

ET SUR LES PAVÉS DE RECOUVREMENT DES PLATES-FORMES AU-DESSUS DES SOUTERRAINS;

Par M. le Lieutenant-colonel du génie DELAAGE.

Le but des chapes et pavés que l'on fait sur les voûtes des casemates ou souterrains, est de préserver ces voûtes des *infiltrations pluviales*. Relativement aux chapes, les matières que l'on a généralement employées jusqu'à présent, pour obtenir l'imperméabilité, sont le plomb et le ciment. De ces deux matières, le plomb aurait sans contredit la préférence si sa cherté n'était un obstacle qui fait presque toujours sacrifier le certain aux leurres de l'économie.

Il est cependant à remarquer, d'après des observations qui nous ont été communiquées par M. le colonel Emy, dans les lumières duquel on doit avoir toute confiance, que le plomb lui-même n'est pas exempt de la corrosion : le temps y fait éclore de petits vers qui en font leur substance; et nous-mêmes, sans nous être douté de l'existence de ces petits vers, nous avions remarqué avec étonnement qu'une

partie des dalles de plomb qui garnissent les noues des mansardes du pavillon des officiers à la citadelle du château d'Oleron, était piquée de petits trous imperceptibles que nous attribuions à de l'oxide de fer incrusté par l'opération du laminage. Le plomb ne serait pas alors lui-même exempt d'inconvénient.

Quant au ciment, dont on fait un plus fréquent usage que du plomb, il est à observer, quelque soin qu'on ait mis dans sa composition et dans son emploi, qu'il n'y a presque pas d'exemple qu'il ait procuré sur des surfaces un peu étendues l'imperméabilité qu'on en attendait.

En réfléchissant bien sur les causes des avaries qui surviennent, malgré toutes les précautions qu'on prend, on a cru trouver la principale d'entre elles dans la perfection même qu'on apporte à la confection des chapes. En effet, les chapes réputées les meilleures sont celles qui acquièrent, sans gerçures, un degré de siccité qui les rapproche de l'état de vitrification de la poterie ; mais comme les maçonneries, quelque vieilles et bien faites qu'elles soient, sont sujettes à des tassemens ou à des commotions d'orages ou d'artillerie qu'il est impossible d'éviter, il en résulte dans les chapes desséchées, des scissures qui donnent un passage facile à l'humidité. C'est donc une précaution illusoire que de faire des chapes qui ne se prêteraient pas aux mouvemens des corps qu'elles recouvrent ; et l'on a dû chercher à leur substituer des matières douées à un plus haut point de cette extensibilité sans laquelle elles sont inutiles.

Ayant eu à refaire, il y a quelques années, les chapes et pavés des plates-formes des casemates du

front de mer à la citadelle du château (île d'Oleron), nous demandâmes et obtînmes la permission d'y faire l'essai de chapes en goudron et chapelure de pierre calcaire, recouvertes d'un pavé en pierre de taille d'un décimètre d'épaisseur. Nous mettions au nombre de nos souhaits plutôt que de nos espérances, que, dans le cas de scissures qui pourraient être occasionnées en hiver, soit par les gelées, soit par le mouvement des masses, les chaleurs de l'été se chargeraient de réparer ces accidens : l'expérience a complétement dissipé nos incertitudes; et sur près de 3,000 mètres carrés de chapes refaites, nous n'avons plus une goutte d'eau de filtration, tandis qu'auparavant il était impossible d'entrer sans se mouiller dans les casemates.

Cette espèce de chape a encore le grand avantage de pouvoir être faite en hiver comme en été; d'être d'une exécution infiniment prompte, et d'offrir des ressources précieuses à la guerre, en l'appliquant sur des blindages quelconques, qu'on peut ensuite recouvrir de terre.

Tout en nous occupant de la matière dont on devait composer les chapes pour restaurer les casemates de la citadelle, nous observions aussi que le ciment employé dans les joints des plates-formes n'était qu'un réseau de racines d'herbes qui remplissait totalement le volume primitif de ces joints. Nous avons pensé que, pour remédier à cet inconvénient, il faudrait substituer au mortier même de ciment, que les pluies pourrissent à la longue, une matière qui ne fût pas perméable à l'eau, et qui pût adhérer aux matériaux avec autant de force que

le ciment. Après bien des recherches, nous avons trouvé que le mélange du brai sec avec le ciment, bien cuit et coulé bouillant, avait toutes les qualités ; sans être sujet à se pourrir et à favoriser la végétation.

Les expériences que nous avons faites nous ont donné des résultats si avantageux, que, quelques heures après l'achèvement du travail, les pierres étaient tellement collées ensemble qu'elles se cassaient plutôt que de se séparer.

Les matières qui, avec le brai, font cohésion, sont le sable ou le ciment. La chapelure de pierre de taille calcaire, si précieuse pour les tartes en goudron, n'a pas de qualité dans ce dernier cas, non plus que la cendre : les mélanges avec ces substances peuvent garnir exactement les entre-corps; mais ils n'ont pas de mordant d'adhésion.

Nous n'hésitons pas à dire que le mélange de brai sec et de sable, dans la proportion d'un quart de brai et de trois quarts de sable, bien cuit et employé bouillant, donne un bitume qui, admis comme mortier, avec des moellons quelconques, tels qu'on les trouve sur les lieux, produira des corps aussi solides et aussi durables que les matériaux les plus recherchés ; ressource bien précieuse dans les cas où l'éloignement des carrières rendrait la pierre de taille d'une cherté trop excessive. Nous avons fait un petit bloc d'un pied cube environ, dans lequel il entrait, avec ce bitume, une quarantaine de galets ramassés à la côte ; nous avons broyé avec ce bloc des pierres de taille d'un plus gros volume que lui, et enfoncé des pavés de rue : les galets se cassaient et s'éclataient

quelquefois; mais ils ne se détachaient point du bitume qui les liait.

Quant au prix, ce bitume ne coûte pas ce que coûte le mortier de ciment et pozzolane; et la faculté qu'il donne d'employer les matériaux de la dernière qualité qu'on peut trouver sur les lieux, en ramène l'usage à des prix moyens.

Après des essais inultipliés, nous nous sommes arrêté aux proportions suivantes, qui nous ont paru propres à donner les meilleurs résultats.

Chapes en goudron.

Les chapes en goudron seront composées de trois parties de chapelure de pierre calcaire bien sèche et bien tamisée, et d'une partie de goudron (1). On commencera par faire chauffer le goudron dans une chaudière, et lorsqu'il entrera en ébullition, on y mêlera, peu à peu, la chapelure bien sèche, en ayant soin de remuer continuellement le mélange avec une palette en bois. On reconnaîtra que le mélange est suffisamment cuit lorsqu'il filera bien au bout de la palette sans montrer de grenure. Lorsque la vapeur qui se dégage devient assez piquante pour exciter la toux, le mélange est déjà trop cuit. Dans ce cas il faut le rafraîchir en y ajoutant du goudron; car sans cela la substance, refroidie, deviendrait cassante.

(1) Les quantités respectives de chapelure et de goudron dépendent de la qualité de la pierre calcaire. Il faudra faire à cet égard des essais préliminaires dans chaque localité. A Bayonne, on mêle six parties de pierre de bidache à trois parties de goudron pour obtenir le meilleur mastic. V. A.

Pour faire les tablettes de ce mastic, on approchera de la chaudière les moules en bois destinés à les former, et qui ne sont autre chose que des tables munies d'un rebord. On saupoudrera le fond de ces moules avec du sable, qu'on nivellera au moyen d'une règle entaillée à l'endroit où elle pose sur le bord, de façon à ne laisser au moule qu'une profondeur égale à l'épaisseur voulue des tablettes, plus la quantité dont la matière s'affaisse par le refroidissement. Il ne restera plus après cela qu'à verser le mélange dans les moules, cuillerée par cuillerée. Une fois refroidies, les tablettes pourront se rouler comme un morceau de cuir, et se transporter, dans cet état, à l'atelier. Pour les employer, on les étendra et on les placera les unes à côté des autres, avec un récouvrement d'un centimètre, en brayant à mesure les coutures avec le même mélange chaud dont les tablettes sont formées.

Du brai-ciment pour pavés et carrelages.

Le brai-ciment destiné à remplir les joints de pavés et carrelages sera composé d'une partie de brai sec, et de trois parties en volume de ciment tamisé, sans être foulé. Pour faire cette composition, on fera fondre d'abord le brai sec dans une chaudière, et lorsqu'il sera fondu et chaud, on y répandra peu à peu le ciment bien sec, en ayant soin de brasser continuellement le mélange à mesure qu'on verse le ciment. Après trois heures et demie de chauffage, on coulera ce mastic dans les joints avec une cuiller, et le plus chaud possible. On brassera toujours, même en versant la matière.

Une attention à avoir, soit lorsqu'on forme les tablettes de goudron dans les moules, soit lorsqu'on coule le brai-ciment dans les joints, c'est de ne pas employer les dernières portions de la substance qui se trouve dans la chaudière : car, quelque soin qu'on ait eu de remuer le mélange pendant l'opération, on n'a pu éviter que les parties les plus pesantes de la pierre ou du ciment ne soient descendues au fond, et n'altèrent, par leur trop grande quantité, les proportions voulues pour ce mélange. Il faut alors rétablir ces proportions, en ajoutant du goudron ou du brai, et en faisant cuire de nouveau.

ANALYSE DES PRIX POUR OLERON.

Chapes en goudron et en chapelure de pierre calcaire d'un centimètre d'épaisseur.

Pour 100 mètres carrés,

Chapelure de pierre de taille...	1,422 m. cub. à 40 fr..	56f 88c
Goudron.....	400 kilogr. à 16 cent.	64. 00.
Fagots de chauffage.....	30. à 42 fr. le cent..	12. 60.
		133. 48
1/20 de déchet pour événemens de la chauffe.....		6. 67.
Dix journées d'ouvriers de chauffe, à 2 fr. 60 cent....		26. 00.
TOTAL pour 100 mètres carrés..		166. 15.
Et pour un mètre carré.....		1. 66.

Joints de carrelages en brai-ciment.

Pour 10 mètres carrés,

Ciment fin en poudre de tuilots passée au tamis.	0,005 mèt. cub., à 52 fr. 05 c..	0f 26c
Brai.....	23 kilogr. 50 centigr., à 20 c..	4. 70.
		4. 96.
1/20 de déchet pour les accidens de la chauffe.....		0. 25.
Journées d'ouvriers pour cuire le brai-ciment...	0,70, à 2 fr. 60 cent.....	1. 82.
Idem de manœuvre....	0,70, à 2 fr. 25 cent.....	1. 58.
Fagots de chauffage....	3, à 42 francs le cent.....	1. 26.
	TOTAL pour 10 mètres carrés...	9. 87.
	Et pour un mètre carré.....	0. 99.

NOTICE

SUR LES CAUSES DE DESTRUCTION DES REVÊTEMENS DE MAÇONNERIE EN BRIQUES, ET SUR LES MOYENS D'Y REMÉDIER;

Par M. le Capitaine du génie BERGÈRE (J. B.).

Les dégradations qu'on remarque le plus souvent dans les revêtemens de maçonnerie en briques, présentent les résultats suivans :

1.° Tous les paremens exposés aux vents pluvieux, qui, pour les pays du nord-ouest de la France, viennent du sud-ouest, de l'ouest et du nord-ouest, sont toujours beaucoup plus dégradés que ceux qui ont d'autres expositions.

2.° Plus les revêtemens sont inclinés, plus on remarque de ces dégradations.

Ces deux faits, depuis long-temps connus, et dont nous avons pu constater l'exactitude sur l'immense développement des fortifications de Lille, prouvent d'une manière évidente que c'est à l'action lente et continue de l'eau qu'on doit attribuer les nombreux écorchemens qu'offraient et qu'offrent encore les fortifications de cette place.

Depuis long-temps aussi on a signalé les murs fortement inclinés comme présentant plus de chances de dégradations : la facilité qu'ont les graines transportées par les vents de s'y arrêter donne naissance à une foule d'herbes et d'arbustes très-vivaces, dont les racines s'introduisent dans les joints et détachent les pierres et les briques ; de plus, l'eau de pluie, pouvant y séjourner plus long-temps, active encore davantage cette végétation et détériore le mortier des lits et des joints.

Ces inconvéniens augmentant avec la multiplicité de ces joints, il en résulte que les murs en briques doivent se dégrader plus rapidement que ceux construits en pierres.

L'habitude où l'on est d'élever les murs en briques par lits réguliers de boutisses et panneresses, a encore été regardée comme une cause de dégradation.

Et voici l'explication qu'on en donnait :

Les joints se dégradent avec le temps, les panneresses sont plutôt dépouillées du mortier qui les fixait au massif ; elles se détachent et finissent par tomber ; les boutisses, portant alors à faux sur la moitié de leur longueur, se trouvent chargées du poids des assises supérieures ; elles se brisent, et de proche en proche les revêtemens s'écorchent sur une demi-brique d'épaisseur.

A ces causes justement appréciées nous essaierons d'ajouter quelques développemens, et nous en indiquerons de nouvelles qui nous paraissent mériter quelque attention. Mais, avant de les présenter, nous allons donner une description des formes particulières qu'affectent le plus souvent les dégrada-

tions qu'on remarque aux fortifications de Lille, et des matériaux qu'on y a employés.

La plupart des murs de revêtement de cette place ont déjà été repris par écorchement, et quoique faits primitivement en mortier de chaux du pays et de sable, on peut se convaincre facilement qu'à l'époque où on les a réparés, on avait déjà reconnu l'action destructive de l'eau sur les paremens, puisque tous les écorchemens ont été refaits en mortier de chaux de Tournai et cendrée, et cependant ce sont ceux-là mêmes qui offrent aujourd'hui l'aspect le plus dégradé.

Dans les nombreux écorchemens qu'on a réparés à Lille depuis 1817, nous avons toujours observé que la séparation du parement se faisait par demi-brique et brique entière; plusieurs, et ce sont la plupart de ceux qu'on a réparés en mortier de chaux de Tournai et cendrée, offrent des boursoufflures dont on peut se faire une idée par les figures 1, 2, 6.

Souvent aussi toute la partie voisine du cordon et le mur de soutenement sont dans un état de dégradation complet : la figure 2 en donnera une idée.

Dans les parties boursoufflées, nous en avons vu d'intactes, et leur rejointoiement parfaitement conservé.

Le mauvais état des parties supérieures des revêtemens avait fait penser à quelques officiers que le mur de soutenement pouvait causer les accidens qu'on y remarque, par le surcroît de pression qu'il exerce sur le parement. Nous ne partageons pas cette opinion : d'abord, on devrait dans ce cas voir tous

les écorchemens commencer par le haut des revêtemens, et cela n'a pas toujours lieu ; ensuite nous ne voyons pas comment le mur de soutenement n'exercerait son action que sur la demi-brique extérieure, tandis qu'il ne peut l'exercer qu'à une petite distance du plan vertical passant par son parement.

D'autres ont prétendu que c'était l'humidité intérieure des terrassemens qui provoquait la destruction des paremens, attendu que, dans les murs isolés, tels que tours, moulins, &c. les dégradations sont moins communes.

Nous répondons à cela que nous avons rarement vu des murs non terrassés avec un parement incliné, si ce n'est dans les moulins à vent; mais dans ce cas la ventilation continuelle produite par le mouvement des ailes suffit pour expliquer leur longue durée, puisque, quelle que soit la quantité d'eau qui s'arrête à leur surface, elle est rapidement évaporée. Dans les tours en briques, le même effet a lieu, car on sait qu'autour de tous les bâtimens élevés il se forme un mouvement d'air continu, provoqué par l'obstacle qu'ils présentent aux vents dans leur partie supérieure.

Nous pourrions encore citer les deux longs murs qui réunissent la citadelle à la place de Lille. Ces deux murs ont leur parement extérieur incliné et sont adossés à de petits arceaux qui supportent une banquette ; mais ils ne sont pas terrassés; et cependant l'un d'eux a été repris par écorchement sur toute sa longueur, par suite de l'état de dégradation où il était, et l'autre est soufflé sur une grande partie de son développement.

D'ailleurs, dans les nombreux écorchemens que nous avons vus à Lille, nous n'avons jamais remarqué la moindre trace d'humidité dans l'intérieur de la maçonnerie, tandis qu'à la surface, l'état de détérioration du mortier prouvait assez qu'il n'a d'autre cause que son voisinage de l'humidité extérieure.

Il n'y a qu'un cas où nous concevions l'action de l'humidité des terrassemens, c'est celui des dégradations voisines du cordon. Comme ces dégradations sont aussi attribuées aux murs de soutenement, nous essaierons d'en donner plus bas une explication qui réponde à ces deux hypothèses.

Nous allons maintenant exposer quelques observations particulières que nous avons faites sur les dégradations que nous venons de signaler. Nous les attribuons à plusieurs causes principales.

La première, et celle qui développe et active toutes les autres, est évidemment due à l'eau des pluies : plus les murs ont de talus, et moins cette eau s'écoule facilement. Ensuite, dans ces murs inclinés, le tassement ne peut se faire uniformément; or, dans tout massif de matière quelconque sujette à se tasser, lorsque le tassement n'est pas uniforme, il y a rupture. Il suit de là qu'en supposant des lits de briques boutisses et panneresses alternatives, ainsi qu'on le pratique habituellement, toutes les queues de boutisses sont soumises à une pression plus forte que leurs têtes, ce qui doit tendre déjà à provoquer leur rupture. Si cette pression agissait isolément, le prisme trapézoïde qui presse la queue des boutisses, ne suffirait peut-être pas pour la déterminer; mais comme les briques s'entrelacent,

il en résulte que la pression se trouve augmentée d'une partie du poids de la maçonnerie qui est liée avec celle du trapézoïde. Si l'on n'employait jamais que de très-bon mortier qui ferait sa prise en peu de temps, cet effet serait insensible ; mais on emploie le plus souvent des mortiers qui sont deux ans et plus à se durcir (la plupart des revêtemens de Lille ont été faits primitivement avec de la chaux du pays, qui est prodigieusement grasse) : l'action des pluies arrive; elle retarde encore la prise du mortier, et le tassement continue.

L'inclinaison des murs présente une autre cause de destruction : c'est que, pour avoir un parement uni dans les murs inclinés, les maçons sont obligés de maintenir leurs assises de briques dans un plan perpendiculaire au parement. Il suit de là que les joints des lits sont dans des plans inclinés vers l'intérieur du mur, et que, lorsque les rejointoiemens sont un peu dégradés, l'eau trouve de petits réservoirs (*abc*, fig. 7), où elle séjourne jusqu'à ce qu'elle ait pu s'introduire dans le parement ; si alors une gelée survient, cette eau, en se congelant, brise les briques de parement.

De cette manière, dans un pays pluvieux, comme le département du Nord, il arrive que rarement les paremens des murs sont secs, quoiqu'ils le paraissent; lorsque les joints sont dégarnis, les racines y croissent plus rapidement, et l'action de ces racines opérant en sens inverse de la pression dont nous avons parlé plus haut, accélère encore la rupture des boutisses. Celles-ci une fois rompues, on voit qu'il se forme derrière le parement un plan

de rupture du bas en haut sur une demi-brique d'épaisseur.

Mais lorsque les murs présentent des boursoufflures, que le mortier qui a servi à leur construction a acquis une grande dureté, que leur rejointoiement est intact, qu'il ne manque pas une seule brique dans la soufflure, on ne peut pas dire alors que c'est la chute des panneresses qui a provoqué la rupture des boutisses. Nous chercherons l'explication de ce fait dans le mode de fabrication du mortier et des matières qui le composent.

Nous avons dit que les boursoufflures se manifestaient plus particulièrement sur les paremens refaits en mortier de chaux de Tournai et cendrée de houille.

La chaux de Tournai étant éminemment hydraulique et donnant d'excellens mortiers sous l'eau, on a sans doute cru qu'on parerait aux inconvéniens de la mauvaise exposition des paremens, en les construisant avec ces mortiers.

Or, l'usage du pays est d'éteindre d'abord la chaux par immersion; aussitôt après on la recouvre de la dose de cendrée ou de sable voulue, ce qui entretient la chaleur et facilite la réduction de la chaux en poudre impalpable; on triture ensuite le mortier dans des bassins, pour celui de chaux et cendrée, et sur les plates-formes, au moyen de rabots, pour celui de chaux et de sable.

Maintenant nous ferons remarquer que tous les anciens devis, et même les nouveaux, recommandent de n'employer que le moins d'eau possible dans ces deux dernières opérations, et ensuite de préparer

toujours les mortiers à l'avance, pour ne les employer que plusieurs jours après.

Ces deux clauses nous paraissent vicieuses, et c'est à elles, ainsi qu'au mode d'extinction de la chaux, que nous attribuons principalement les dégradations signalées plus haut.

En effet, quelque précaution qu'on prenne en éteignant la chaux et pour l'amener à l'état de poudre impalpable, on ne peut éviter qu'il ne reste beaucoup de globules non éteints; lorsque cette chaux, recouverte de sable, reste exposée plusieurs jours à l'action des pluies ou à l'humidité de l'atmosphère, elle en absorbe une nouvelle quantité, qui agglomère les particules de chaux, les durcit tellement à leur surface qu'il devient impossible de les réduire ensuite. Nous avons fait substituer aux rabots en bois des espèces de houes en fer bien préférables, et cependant nous ne pouvons encore parvenir à obtenir du mortier privé de ces globules.

Nous remarquerons ensuite que, dans tous les grands ateliers, on est dans l'usage de préparer à l'avance des masses considérables de mortier dans un état de mélange très-imparfait, et les derniers tas sont exposés de la sorte à l'action des pluies, pendant quinze jours au moins, avant d'être employés : la chaux a donc le temps de se durcir; et il résulte de là que le premier mortier employé se broie toujours plus facilement et donne de meilleure maçonnerie, tandis que dans celle faite avec les derniers tas, le noyau des globules, finissant par être en contact avec l'humidité du parement, s'en empare en augmentant de volume; et de là doivent

résulter, ce nous semble, les écorchemens et boursoufflures partiels qu'on remarque sur quelques revêtemens.

Quant au mortier de chaux et cendrée, la recommandation de n'y ajouter qu'une très-petite quantité d'eau est encore plus nuisible : car de ce que la chaux est réduite en poudre, il ne s'ensuit pas qu'elle soit complétement éteinte, puisque la quantité d'eau employée à cette opération est tout au plus le tiers de celle qu'absorberait la chaux pour se réduire en pâte molle, placée sous un grand volume d'eau.

Ce procédé peut être très-bon, et nous avons eu plusieurs occasions de nous en convaincre, lorsque le mortier de chaux et cendrée doit être employé sous l'eau; dans ce cas, il y a toujours une perte de chaux dans le trajet, et la chaux restante ne tarde pas à s'emparer de toute l'eau qu'elle peut solidifier : mais lorsque les mortiers de ce genre doivent être exposés à l'air et à l'humidité de l'atmosphère, l'action de l'eau est plus lente, et à la longue elle pénètre toutes les particules de chaux non éteintes, augmente leur volume en se solidifiant, et la somme de tous ces efforts, très-divisés et très-lents, mais continus, peut seule expliquer les boursoufflures que nous avons décrites. On aura de fortes raisons de s'en convaincre par l'exposé du fait suivant, qu'on peut observer encore sur plusieurs revêtemens de la place de Lille. Il consiste en ce que dans un mur d'escarpe privé de parapet l'effort exercé par une soufflure a été tel que la partie supérieure du mur a été soulevée (voir la figure 6).

Quelle autre cause que celle que nous indiquons, pourrait avoir développé la force nécessaire pour produire ce résultat (1) !

On voit aussi à Lille des contrescarpes qui étaient couronnées par un pavé de briques de champ : ces contrescarpes, entièrement dégradées dans quelques parties, ont conservé leur couronnement suspendu sur une très-grande longueur, et présentent des plates-bandes dont on ne peut concevoir l'existence qu'en admettant une force d'extension extraordinaire dans le mortier qui les unit (2).

Ces mêmes observations vont nous donner les moyens d'expliquer les dégradations des parties supérieures des revêtemens ; mais avant, il est bon de faire connaître leur état antérieur.

Nous avons déjà dit que presque tous les revêtemens de la place de Lille avaient été repris par

---

(1) On ne peut pas attribuer l'effet des soufflures à l'action seule de la gelée, parce qu'au moment du dégel, il faudrait que la maçonnerie reprît son volume et sa forme primitive, ou se renversât, puisque la force de cohésion du mortier serait nécessairement détruite. Or, dans les soufflures intactes et qui se maintiennent long-temps dans cet état, ainsi que nous l'avons observé, le mortier était si bon, qu'il fallait employer un certain effort pour faire tomber la soufflure.

Dans le cas des plates-bandes, l'explication par la gelée serait évidemment inadmissible.

Nous ne considérons l'action des gelées que comme pouvant faciliter la rupture des briques dans les écorchemens partiels ou successifs.

(2) Nous avons aussi remarqué à Béthune une courtine construite entièrement en grès : elle présente une soufflure semblable à celles qu'on voit aux murs en briques de Lille. Il n'y a que le tiers des joints dans le premier cas, et cependant l'effort d'extension du mortier a été suffisant pour provoquer la soufflure.

écorchement; et dans ceux que nous avons refaits depuis 1817, nous avons toujours remarqué qu'à partir de l'angle rentrant *b* (*fig. 2*), et suivant la ligne *be*, la partie supérieure du revêtement était toujours plus consommée que le reste de l'écorchement : les contreforts qu'on y pratiquait étaient du reste peu propres, par leurs faibles dimensions, à maintenir le nouveau parement avec le massif. Pl. 1.re

Ces faits posés, nous observons que, pour réparer ces écorchemens, nos devanciers étaient obligés, ainsi que nous le faisons à présent, de former le déblai *a b c d*, et de refaire entièrement le mur de soutenement.

Voyons maintenant comment les dégradations que nous remarquons aujourd'hui ont pu avoir lieu.

Le parement immédiatement achevé, on a terrassé; mais, quelque damé que soit un nouveau terrassement à côté d'un plus ancien, il y a toujours tassement; quelque petit qu'ait été le tassement, il a dû se former deux lignes de rupture *ab* et *cd*, et la partie de la plongée correspondante aux déblais s'est formée en petit bassin, où toute l'eau de pluie qui tombe sur la plongée, a dû se réunir, puis traverser le nouveau remblai, et s'arrêter en partie dans l'angle *c*. Le même effet doit avoir lieu dans les terrassemens neufs, sur-tout s'il se trouve de l'herbe sur le couronnement du mur.

Tous ces faits ont pu être inaperçus, d'autant plus que l'herbe croît rapidement sur les nouveaux remblais. Cette eau, gagnant de proche en proche, a dû entretenir une humidité constante dans la partie supérieure des revêtemens, et commencer à altérer

la bonté de la maçonnerie ; lorsque ensuite l'effort de la soufflure a été assez grand pour soulever la partie *abc*, il s'est formé une rupture de *c* en *b*, par laquelle l'eau de la plongée a pu pénétrer derrière cette soufflure : l'eau, agissant ainsi dans tous les sens sur la partie soufflée, a dû accélérer son état de dégradation et sa chute.

L'usage des cordons en saillie offre encore une cause de dégradation qui, quoique peu importante, ne doit pas moins le faire rejeter. On ne peut pas admettre qu'on ait voulu leur faire jouer le rôle de corniches ; car la forme arrondie qu'on leur donne paraît peu propre à remplir cet objet ; leur saillie, au contraire, facilite la formation d'un dépôt terreux, qui, en conservant toujours un peu d'humidité, la communique aux maçonneries voisines et donne naissance à une foule d'arbustes très-nuisibles ; ensuite le cordon formé à Lille de trois assises de grès ne présente que deux joints horizontaux, tandis que la maçonnerie de briques, qui est derrière, en présente huit. Le tassement de celle-ci est plus grand ; il y a donc une petite rupture qui doit mettre en communication l'humidité du cordon avec celle de l'intérieur, et entretenir le massif *abcd* dans une humidité constante.

Si l'on veut que le cordon détermine le plan de plongée des embrasures, ce qui cependant ne paraît pas avoir toujours été le but qu'on a voulu atteindre en les adoptant, qui empêche de le mettre dans le plan du parement ! On remarque encore sur quelques parties des revêtemens de Lille, quelques petits écorchemens de moins d'une demi-brique d'épaisseur.

Les panneresses sont détériorées dans le sens de la longueur ; cet accident ne peut guère être attribué qu'à l'extrême porosité des briques, qui, étant souvent humides, se fendillent et éclatent quand une gelée survient.

Quoique les causes que nous venons d'indiquer nous paraissent les plus influentes sur la destruction rapide des revêtemens, nous allons cependant ajouter quelques observations sur les différens appareils de briques le plus généralement employés, et sur les rejointoiemens.

On retrouve dans de vieilles maçonneries l'appareil indiqué par la figure 8, composé de lits successifs de boutisses et panneresses. A la seule inspection du dessin, on voit combien cet appareil est vicieux, puisque le plan de moindre résistance mené dans le sens longitudinal des murs, à la profondeur d'une brique, ne couperait aucune brique et passerait seulement par le joint.

Dans le deuxième appareil (fig. 9), composé de briques boutisses et panneresses alternatives, le plan de moindre résistance ne coupe les briques que sur un tiers de sa surface, pour la profondeur d'une demi-brique, et ne les coupe pas du tout à la profondeur d'une brique, à moins qu'on n'ait soin de continuer le mur tout en boutisses, ce que les maçons négligent souvent de faire.

En général, toutes les fois qu'on veut construire par boutisses et panneresses, on ne doit placer des panneresses qu'au parement; autrement, à chaque épaisseur de brique, il se trouve un plan total de rupture.

Dans le troisième appareil (fig. 10), chaque

assise est composée successivement d'une panneresse et de deux boutisses jointives ; le reste est achevé en boutisses. L'assise supérieure doit être disposée de manière à croiser les joints verticaux.

Cet appareil est, sans contredit, préférable aux deux premiers, puisque le plan de moindre résistance, pour chaque brique et demi-brique de profondeur, y coupe les briques sur la moitié de sa surface. Cependant nous y trouvons encore l'inconvénient qu'il est impossible de croiser les joints verticaux de manière à éviter un petit joint vertical et continu, correspondant aux parties *a*, *b*.

Le quatrième appareil enfin (fig. 11), adopté à Lille depuis 1817, se compose de lits successifs de boutisses entières et demi-boutisses au parement ; le reste du mur est achevé en boutisses entières. Nous croyons cet appareil préférable aux trois précédens : 1.° parce qu'il offre les mêmes avantages que le troisième, par rapport aux plans de moindre résistance ; 2.° en ce que les parties qui le composent sont plus divisées ; 3.° en ce que, les demi-briques n'étant jamais bien égales, cela rompt la continuité de ce plan ; 4.° tous les joints verticaux se recouvrent totalement toutes les trois assises, pour peu qu'on recommande aux maçons de placer leurs demi-briques en quinconce ; 5.° ce mode est d'une exécution et d'une surveillance facile ; 6.° enfin il est plus économique, puisque l'évaluation du déchet est nécessairement moindre dans la détermination du prix de la maçonnerie.

Cette considération du plan de moindre résistance est d'autant plus importante que les mortiers qu'on emploie sont de médiocre qualité.

Depuis long-temps on avait proposé de faire des briques plus longues de moitié pour les paremens, qu'on aurait placées alternativement contre des briques ordinaires. Ce procédé, qui remplirait le but qu'on a cherché dans l'appareil adopté à *Lille*, exigerait que tous les entrepreneurs fissent eux-mêmes leurs briques, et augmenterait probablement le prix de la maçonnerie, eu égard à l'augmentation de soin, tant pour le moulage que pour la cuisson, que nécessiteraient des briques de cette longueur.

Un bon rejointoiement a toujours été regardé comme un grand moyen de conservation des paremens de maçonnerie en briques, et cependant, malgré les précautions qu'on prend, il arrive souvent qu'ils se dégradent dans les deux ou trois années qui suivent leur exécution : nous allons entrer dans quelques détails à ce sujet.

Quand les maçonneries sont faites avec des mortiers où il entre de la chaux grasse, il arrive que la surface du parement se sèche plus rapidement que la maçonnerie de l'intérieur; le mortier de celle-ci, à mesure qu'il fait sa prise, abandonne de l'eau qui avait servi à sa formation, laquelle se porte à la surface; une gelée survient et fait sauter le rejointoiement.

Lorsque le mortier employé est fait avec de la chaux hydraulique mal éteinte, l'humidité extérieure gonfle rapidement les globules de chaux qu'il contient, et les fait éclater; cela détruit le poli de la surface du joint, forme de petites cavités où l'eau peut s'arrêter et commencer sa destruction.

Pour éviter une partie de ces inconvéniens, on a

adopté assez généralement le parti de remettre l'opération du rejointoiement à l'année suivante, dans les maçonneries neuves. Cette précaution est bonne lorsque ces maçonneries sont faites avec des mortiers de chaux commune; mais lorsqu'on fait usage de chaux hydraulique, la prise et la dessiccation du mortier s'opèrent rapidement; il arrive alors que si l'on remet le rejointoiement à l'année suivante, le mortier s'est déjà tellement durci, qu'on ne peut plus dégarnir les joints sans briser les angles des briques, et encore ne peut-on que très-peu enfoncer l'outil qui sert à cette opération. Il en résulte que le nouveau mortier du joint n'appuie sur l'ancien que par une surface arrondie, et qu'il manque rarement de tomber, dans les deux ou trois années suivantes. (*Voyez* le joint *a*, figure 7.)

Nous avons essayé, il y a deux ans, un nouveau procédé, qui, nous le pensons, obvie à ces inconvéniens, d'autant plus qu'on peut l'appliquer à toute espèce de mortiers, et ajourner le rejointoiement jusqu'à ce qu'ils aient fait leur prise.

Lorsque le mur sur lequel nous avons fait cet essai a été achevé, nous avons de suite fait dégarnir les joints sur deux à trois centimètres de profondeur; opération facile, puisque le mortier était frais, et sans inconvénient pour la solidité du mur : l'année suivante, nous n'avons eu qu'à faire rafraîchir la partie extérieure de l'ancien mortier, balayer et laver les joints; le rejointoiement s'est alors opéré facilement. De cette manière, la quantité de mortier introduite dans les joints est assise sur une queue suffisante pour la maintenir et la fixer solidement. Nous ajouterons que les maçons ont souvent la manie de

faire le mortier de rejointoiement plus *gras*, suivant leur expression, c'est-à-dire, d'augmenter la quantité de chaux qui entre dans sa composition ordinaire; nous recommanderions plutôt le contraire, par les raisons que nous avons déjà données plus haut. La proportion d'une partie de chaux vive de Tournai et de trois parties de sable nous a très-bien réussi.

Nous proposerions encore de donner aux rejointoiemens la forme du joint *f* (fig. 7), de façon que l'arête inférieure de la brique de dessus fasse larmier sur le joint; ce qui facilite l'écoulement de l'eau sur le parement et empêche qu'elle ne pénètre dans le joint, ainsi qu'il arrive dans les rejointoiemens ordinaires, dont les bavures servent à l'arrêter.

Ce mode a été employé avec succès à Valenciennes, et pourrait être suivi par-tout.

Depuis sept ans, on a remédié, à *Lille*, à une partie des inconvéniens que nous venons de décrire, dans toutes les reprises par écorchement, 1.° en donnant aux contreforts des dimensions assez fortes pour rattacher le nouveau parement au massif (ils sont espacés de trois mètres d'axe en axe, et ont un mètre de largeur, taillés à queue d'aronde); 2.° en formant, sur la partie supérieure des murs, des coussinets inclinés, *m m* (fig. 3 et 5), en briques de champ de choix, et posés en mortier de chaux et cendrée de Tournai (nous pensons que celui de la figure 4 lui serait encore préférable); 3.° en proscrivant la chaux du pays, et la remplaçant par celle de Tournai.

Nous allons maintenant proposer quelques autres améliorations qui nous paraissent devoir prolonger de beaucoup la durée des paremens de briques.

En faisant connaître les vices du mode suivi pour éteindre la chaux de Tournai, c'est dire assez que nous voudrions qu'il fût proscrit, et qu'on lui substituât le procédé d'extinction ordinaire. Nous le conseillerions lors même que le mortier résultant de ce dernier procédé serait d'une qualité inférieure, pour la dureté, à celui actuel; mais il n'en est pas ainsi: car, d'après les expériences de M. Vicat sur les chaux éminemment hydrauliques destinées à composer du mortier ordinaire, les différens modes d'extinction de ces chaux se classent de la manière suivante, d'après leur ordre de bonté: 1.° extinction ordinaire; 2.° extinction par immersion; 3.° extinction spontanée. Le mode que nous préférons aurait en outre l'avantage de procurer une grande économie sur la trituration du mortier, si du reste on n'était convaincu que l'emploi des machines en procure encore une plus grande, avec une meilleure confection.

A ce que nous avons déjà dit sur les différens appareils de briques qu'on emploie le plus souvent, nous ajouterons quelques observations sur la nature des briques employées dans le département du Nord. L'argile qui sert à leur fabrication contient beaucoup de silice très-divisée, et fort peu d'alumine comparativement à celle que renferment les argiles communes. Cette circonstance explique la grande porosité de ces briques, et leur propriété d'absorber l'eau. Le procédé employé pour corroyer la terre est très-imparfait; l'ouvrier chargé de cette opération n'a d'autres outils qu'une pelle et une espèce de houe; et comme il doit suffire à son mouleur, qui façonne

habituellement dans sa journée six mille briques, il résulte que le premier doit corroyer à peu près neuf mètres cubes de terre dans le même temps; quantité beaucoup trop forte pour qu'on puisse en attendre un bon résultat. Il est vrai de dire aussi que les briques ont un prix peu élevé, puisqu'elles ne reviennent guère au fabriquant qu'à 9 ou 10 francs le mille, tout compris.

Cependant nous pensons qu'il serait possible d'améliorer cette fabrication, au moins pour les briques de parement, en adoptant aussi l'usage des machines pour corroyer la terre. Celle qu'emploie, à Paris, M. de Saint-Léger, dans sa préparation des chaux hydrauliques factices, nous paraîtrait très-propre à cet objet. (*Voyez* le devis-modèle, note 35.*)

Pour diminuer l'inconvénient de la porosité des briques, inhérent à la nature du sol, nous proposerions de recouvrir la tête des briques de parement d'une couche de vernis, en ayant soin de choisir celles qui seraient le mieux moulées et qui auraient été façonnées par le temps le plus sec; ce qui serait très-facile. Ces deux innovations n'augmenteraient pas d'une manière sensible le prix des briques, puisqu'il n'y aurait guère à ajouter que celui du vernis, et que l'excédant de main-d'œuvre serait à peu près nul. Il serait à désirer que, dans le moulage des briques, on pût les soumettre à une forte pression, soit par le moyen d'un balancier, soit par celui de la presse hydraulique. Les essais qu'on a tentés jusqu'à présent, n'ont réussi que dans la préparation des briques réfractaires, parce que, leur consommation n'étant pas très-grande, on tient beaucoup moins à

l'économie qu'on peut faire sur leur fabrication, qu'à leur donner, au plus haut degré possible, la propriété de résister à une forte chaleur.

Dans les briques ordinaires, l'excès de main-d'œuvre qui résulterait du même mode, ne serait pas compensé par les avantages qu'on en retirerait.

Enfin, nous proposerions de supprimer, dans toutes les maçonneries neuves, le talus qu'on donne habituellement aux paremens des revêtemens.

Cette suppression occasionnerait des dépenses considérables dans les anciens murs, si on la faisait totale; mais ne pourrait-on pas se borner à réduire le talus de moitié, en avançant leur sommet du quart de la base du talus, et reculant d'autant le soubassement! Le cube de la maçonnerie à refaire par écorchement ne serait pas augmenté, et la solidité des murs ne pourrait pas non plus en être altérée, malgré la diminution du moment de la résistance, puisque les terrassemens qui se trouvent derrière ont pris toute la consistance qu'ils peuvent avoir.

On remédierait encore en partie à l'inconvénient suivant. Dans les reprises par écorchement, on est obligé, pour ne pas se jeter dans des dépenses énormes, de donner à l'écorchement l'inclinaison du parement, et souvent même il est plus large à la partie supérieure; d'où il suit que le nouveau massif s'appuie sur un plan incliné, sur lequel il tend naturellement à glisser; et ce mouvement est toujours facilité par le tassement obligé de la nouvelle maçonnerie.

En résumant tout ce qui précède, on voit que c'est toujours l'eau qui agit comme cause première

dans la destruction des murs de revêtement, sur-tout pour la formation du plan de rupture derrière le parement d'une demi-brique.

Bien que toutes les forces qu'elle engendre soient très-divisées et très-petites, il n'en est pas moins très-probable que leur grande multiplicité, et sur-tout leur continuité d'action, suffisent seules pour déterminer les grands effets que nous avons signalés.

Nous rappellerons, comme exemples de l'action de l'eau dans la production de forces énormes, et qui rentrent dans le cas de celles que nous avons indiquées comme pouvant occasionner les écorchemens, la rupture des meules à aiguiser au moyen de coins de bois mouillés, la dilatation irrésistible du plâtre humecté, et celle de l'eau même passant à l'état de glace.

En nous livrant à l'examen des questions contenues dans cette notice, nous n'avons eu d'autre but que de faire connaître quelques faits qu'un long séjour dans une des plus grandes places du royaume nous a permis de bien observer. Quant aux explications que nous en donnons, c'est avec toute la réserve possible que nous les soumettons à ceux qui, par leurs lumières et leur longue expérience, sont, plus que nous, capables d'en apprécier la valeur.

MÉMOIRE

SUR

LA PÉNÉTRATION ET L'EFFET DES PROJECTILES;

Par M. le Chef de bataillon du génie AUGOYAT.

LA pénétration des projectiles dans les différentes matières qui sont employées en fortification à former les masses couvrantes, a été fréquemment l'objet d'expériences faites par les officiers d'artillerie et du génie. Les résultats de ces expériences sont utiles à connaître dans les deux armes, sous plusieurs rapports. Nous nous proposons de rassembler dans ce mémoire ceux qui ont été le mieux constatés, et de les comparer à ceux que donne la théorie de la pénétration.

CHAPITRE I.er

THÉORIE DE LA PÉNÉTRATION, SUIVANT CAMUS, EULER, HUTTON (1).

1. On pose en principe, dans cette théorie, que la résistance à la pénétration peut être assimilée à une force retardatrice constante, indépendante de la

(1) Camus, *Mém. de l'acad. des sciences*, 1738; Euler, *Nouveaux Principes d'artillerie de Robins*; Hutton, *Traités mathém. et philos.* Londres, 1812, tome III; Moore, *Journal de Nicholson*, 1811.

vitesse du mobile. Cette proposition admise, le milieu supposé homogène, et le mobile spherique et parfaitement dur, la résistance à la pénétration est la même à toutes les profondeurs, à partir de l'instant où le centre du mobile (figures 1 et 2) est enfoncé à la profondeur cf, dont la valeur dépend de l'angle acb sous lequel le mobile rencontre la surface du milieu. Nous supposons que cet angle est droit ou presque droit, que la surface du milieu est plane, et nous considérons le mouvement à partir de l'instant où le centre du mobile pénètre dans le milieu. Soit (figure 1) c' la position du centre du mobile, lorsqu'il n'est plus animé d'aucune vitesse: cc' est la pénétration qui est déterminée par le calcul; cd est la pénétration totale. Pl. II.

Nous ne nous occuperons que des projectiles sphériques, qui sont les plus communs. Tous, à l'exception des balles de fusil, qui sont en plomb, conservent la forme sphérique pendant la pénétration. On peut supposer qu'ils sont parfaitement durs, et que les milieux sont homogènes. Mais le principe fondamental de la théorie que nous employons n'est pas mathématiquement exact, parce que toutes les forces passives ou de résistance dépendent des forces actives qui les provoquent et les mettent en exercice; c'est ainsi que la résistance au mouvement, dans les fluides, est une fonction connue de la vitesse des mobiles. Cependant ce principe a été admis par les auteurs que nous avons cités; en le suivant dans ce mémoire, nous prévenons toutefois qu'il n'est pas démontré, ne paraît pas susceptible de l'être, et sur-tout qu'il ne peut pas être appliqué,

au même degré d'exactitude, à toutes les masses couvrantes, qui, de leur nature, sont si différentes les unes des autres.

2. Cela posé, soient d le diamètre du projectile, D sa densité, v sa vîtesse à l'instant de la pénétration, v' sa vîtesse au bout du temps t'; e l'espace correspondant à v' et t', et qui exprime la pénétration; g la force accélératrice de la pesanteur, qui est égale à $980^c,88$ (nous prenons le centimètre pour unité de longueur, le gramme pour unité de poids, et la densité de l'eau pour unité de densité); $\pi = 3,14$ le rapport de la circonférence au diamètre; f la vîtesse qui est détruite à chaque seconde dans le projectile, laquelle représente la force retardatrice constante. On aura

$$v' = v - ft' \ldots (1), \quad e = vt' - \tfrac{1}{2} ft'^2 \ldots . \quad (2)$$

Ce sont les équations du mouvement, uniformément retardé, qu'on suppose avoir lieu pendant la pénétration.

La masse du mobile étant égale à $\frac{1}{6}\pi d^3 D$, la quantité de mouvement qu'il perd à chaque seconde a pour expression $\frac{1}{6}\pi d^3 Df$; elle doit être égale à la résistance. Celle-ci, dans les fluides, est en raison du carré du diamètre des projectiles, supposés sphériques; admettant la même loi dans les masses couvrantes, la résistance pourra y être regardée comme équivalente au poids d'une colonne d'eau de même diamètre que le projectile, et d'une hauteur h : ce qui donne

$$\tfrac{1}{6}\pi d^3 Df = \tfrac{1}{4}\pi d^2 hg, \text{ d'où } f = \frac{3g}{2Dd} h. \quad (3)$$

Mettant cette valeur de f dans les équations (1) et (2), on aura

$$v' = v - \frac{3gh}{2Dd}\,t' \ldots (4), \quad e = vt' - \frac{3gh}{4Dd}\,t'^2 \ldots (5)$$

Faisant $v' = o$ dans les équations (1) et (2) et dans celles (4) et (5), pour avoir la pénétration totale, on trouvera

$$e = \frac{v^2}{2f} = \frac{Ddv^2}{3gh} \ldots \quad (6)$$

Ainsi la pénétration est en raison directe du diamètre, de la densité et du carré de la vîtesse du projectile, et en raison inverse de la quantité constante h.

3. On verra, dans les chapitres suivans, que cette loi approche assez de la vérité. On doit s'étonner qu'elle ait été ignorée de Bousmard, et que ce savant ingénieur, confondant la pénétration avec la percussion, ait évalué l'enfoncement des projectiles en raison de leurs poids et de leurs portées, ou en raison des portées et des cubes des diamètres, sans tenir compte de la résistance, qui est en raison des carrés des diamètres.

On conçoit qu'il ait assigné, en opposition avec l'expérience, des pénétrations trop faibles aux boulets des petits calibres, et des pénétrations trop fortes aux obus, en déduisant les unes et les autres de celles du boulet de 24.

4. On tire de l'équation (6)

$$f = \frac{v^2}{2e} \ldots (7), \quad h = \frac{Ddv^2}{3ge} \ldots \quad (8)$$

f varie pour chaque projectile h, dans la suppo-

sition que la théorie est rigoureusement exacte, est constante pour tous les projectiles, le milieu étant le même. C'est pourquoi quelques auteurs considèrent la quantité h comme représentant la ténacité du milieu. C'est à tort, par exemple, que Hutton (ouvrage cité, pages 282, 284) prend une moyenne entre les valeurs de f qu'il a obtenues, les unes pour la balle d'une livre, les autres pour la balle de trois livres. La quantité f est d'autant plus petite (équation 3) que le projectile est plus gros; aussi existe-t-il une grande différence entre les valeurs de f sur lesquelles l'auteur anglais prend une moyenne (1).

5. Il est nécessaire, pour faire usage de l'équation (6), de fixer les diamètres et les densités des projectiles, de calculer leurs vitesses finales à différentes distances, et de déterminer les valeurs de h dans les masses couvrantes.

La densité des balles de plomb est 11,188 (*Aide-mémoire d'artillerie*, page 544.)

La densité des boulets est 7,166, d'après les pesées de plusieurs boulets faites anciennement par Lombard. La densité des boulets anglais est 7,435; elle est plus grande de $\frac{1}{27}$ que celle des boulets français; la différence entre les pénétrations serait également de $\frac{1}{27}$ environ.

La densité des projectiles creux est variable. Elle est évaluée communément aux $\frac{3}{5}$ de celle des boulets pleins. Nous l'avons supposée de 4,80, et celle de

(1) Une faute de calcul a également induit Hutton en erreur (page 285) sur le rapport qui existe entre les valeurs de h calculées dans le bois d'orme et dans les terres rassises.

l'obus de 6 pouces de 5,24, d'après Lombard. La densité des bombes n'excède pas communément 4,80.

6. On trouvera dans le tableau *ci*-contre les valeurs de *d* que nous avons employées dans le calcul; ce sont les diamètres moyens des projectiles. Afin que l'on connaisse toutes les données relatives à l'état de la question à l'époque où elle est traitée, nous présentons en outre, dans le même tableau, les diamètres des grandes lunettes de réception des *projectiles*, les *minima* de vent des pièces, *enfin les longueurs* d'ame des pièces en diamètres de la petite lunette. On aura les calibres des pièces (abstraction faite de la *tolérance*) en ajoutant aux diamètres des grandes lunettes, les *minima* de vent.

Suit le tableau des diamètres des projectiles, &c.

TABLEAU des diamètres des projectiles, des vents et des longueurs d'ame des bouches à feu.

PROJECTILES.	DIAMÈTRES moyens en centimètr.	DIAMÈTRES des grandes lunettes.	*MINIMUM* (1) DE VENT des pièces.		LONGUEUR D'AME des pièces en calibres du projectile.	
BALLES	centimètr.	centimètr.	millimètres.			
de 19 à la livre,	1,64.	1,64.	1,1.		70.	
de 14 *idem*....	1,81.	//	//		//	
de 8 *idem*....	2,17.	//	//		//	
					PIÈCES	
BOULETS					de siége.	de campagne.
de 48.....	18,50.	18,60.	4.		18.	//
de 36.....	16,71.	16,81.	3 1/3.		20.	//
de 24.....	14,83.	14,93.	*Idem.*		21.	//
de 16.....	12,93.	13,03.	*Idem.*		23.	//
de 12.....	11,82.	11,90.	2 1/4.		24.	17.
de 8.....	10,31.	10,38.	*Idem.*		25.	*Idem.*
de 6.....	9,36.	9,44.	*Idem.*		//	*Idem.*
de 4.....	8,10.	8,20.	*Idem.*		26.	*Idem.*
de 3.....	7,31.	//	*Idem.*		//	11.
			OBUSIERS		OBUSIERS	
OBUS			anciens.	nouveaux.	anciens.	nouv.
de 8 pouces...	21,99.	22,11.	2 1/4.	//	3.	//
de 6 *idem*. ...	16,29.	16,35.	*Idem.*	1 1/2.	3.	11 1/10.
du calib. de 24.	14,87.	14,93.	*Idem.*	*Idem.*	5.	10 1/4.
du calib. de 12.	11,84.	11,90.	//	*Idem.*	//	6 1/7.

(1) Le *maximum* de vent des fusils est de 15 décimillimètres, parce que l'on tolère 4 décimillimètres en dessus dans la réception des canons de fusil; comme l'on tolère 8 décimillimètres en dessus dans la réception des bouches à feu, et que la différence qui existe entre les diamètres des deux lunettes de réception est de 17 décimillimètres pour les boulets et de 12 décimillimètres pour les obus; il faut ajouter pour les canons 2 1/2 millimètres, et pour les obusiers 2 millimètres, aux nombres qui expriment le *minimum* de vent de ces bouches à feu, pour avoir leur *maximum* de vent.

7. Avant de passer aux vîtesses finales des projectiles à différentes distances, nous devons déterminer leurs vîtesses initiales. Les unes et les autres ont été l'objet de beaucoup de recherches théoriques et expérimentales. Les vîtesses initiales ne peuvent pas être assignées *à priori* par le calcul, dans l'état actuel de la science; elles varient suivant les charges, la qualité de la poudre, le vent et la longueur d'ame des pièces &c. Voici les principes qui nous ont guidés dans la détermination des valeurs que nous leur avons assignées.

1.° b et b' étant les poids de deux projectiles, c et c' ceux des charges correspondantes, v et v' les vîtesses, si les rapports $\frac{c}{b}, \frac{c'}{b'}$ sont à peu près égaux, que les projectiles aient à peu près le même poids, que toutes choses soient égales ou semblables dans les bouches à feu, on aura

$$v : v' :: \sqrt{\frac{c}{b}} : \sqrt{\frac{c'}{b'}},$$

$$v^2 : v'^2 : \frac{c}{b} : \frac{c'}{b'},$$

$$v^2 = \frac{c}{b} \cdot \frac{v'^2 b'}{c'} \ldots\ldots \quad (9)$$

La quantité $\frac{v'^2 b'}{c'}$, supposée déterminée avec exactitude par l'expérience, peut être considérée comme un coefficient constant dans tous les cas où le principe duquel nous sommes partis est applicable; par exemple, lorsqu'il s'agit de ramener à une charge de $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, &c. du poids du projectile, les vîtesses

qui répondent à des rapports à peu près égaux à ceux-ci, mais exprimés en termes moins simples. Nous avons dû souvent faire de semblables calculs. C'est à ce coefficient, présenté sous une forme un peu différente (lequel du reste est extrêmement variable), qu'un auteur anglais a donné le nom de *force dynamique* de la poudre dans les bouches à feu.

2.° Les vîtesses initiales croissent *à peu près* comme les racines cinquièmes des longueurs d'ame. On parvient à ce résultat en analysant les expériences de Hutton (Coste, *Recherches balistiques* &c. Paris, 1823, page 115).

3.° On trouve, en appliquant l'équation (9) au calcul des expériences sur la pièce de 12, rapportées un peu plus loin, que les vîtesses qui répondent à la même charge sont :: 23 : 20, lorsque les vents de la pièce sont :: 2 : 5.

8. La vîtesse des balles qui sont chassées dans les fusils ou les mousquets avec des charges égales à la moitié du poids des balles, est de 488 à 518 mètres, suivant les expériences de Robins et d'Antoni; de 438 mètres, suivant les expériences faites en 1778 par Benjamin Thompson (Rumford, *Trans. philos.* 1781); de 428 mètres, suivant les expériences faites en 1803 par des commissaires de l'académie des sciences, avec la machine de Grosbert. Nous avons supposé une vîtesse initiale de 500 mètres aux balles du fusil de munition, et une vîtesse initiale de 525 mètres aux balles du fusil de rempart ordinaire. On sait que les premières sont aujourd'hui de 19 à la livre (elles étaient de 20 autrefois), et que

les secondes sont de 14 à la livre seulement. On manque d'expériences sur la vîtesse initiale des balles forcées.

9. Les vîtesses initiales des boulets de tout calibre ont été déterminées avec précision, dans ces derniers temps, en Angleterre, au moyen du pendule balistique. Voici quelques-uns des résultats qu'on a obtenus :

Pièce de 6 ; longueur d'ame, 23 calibres ; vent, 2 1/2 millimètres ; diamètre du boulet, 9 centimètres ; poudre excellente ; expériences de 1791. (Hutton, ouvrage cité, pages 133, 151.)

$\frac{c}{b}$ =	$\frac{1}{2}$.	$\frac{1}{3}$.	$\frac{1}{4}$.	$\frac{1}{6}$.	$\frac{1}{12}$.
v =	546^m	503^m	464^m	398^m	276^m
$v^2 \frac{b}{c}$ =	596232.	759027.	861184.	950424.	907500.

Pièce de 12 ; longueur d'ame, 16 1/2 calibres ; expériences de 1818. (*Annales de physique et de chimie*, tome IX, page 289.)

Diamètres des boulets.	Vent.	$\frac{c}{b}$	v	$v^2 \frac{b}{c}$.
11^c,53.	2$^{mill.}$	$\frac{1}{4}$.	460^m	846400.
11^c,23.	5$^{mill.}$	$\frac{1}{3}$.	467^m	654267.

Pièces de 24 ; expériences de 1815. (*Voyages dans la Grande-Bretagne*, par M. Ch. Dupin, *Force navale*, tome II, page 105.)

Longueur d'ame.	$\frac{c}{b}$	v.	$v^2 \frac{b}{c}$.
19$^{calibres.}$	$\frac{1}{6}$.	403^m	974454.
15$^{calibres.}$	$\frac{1}{6}$.	388^m	903264.

Nous avons supposé une vîtesse initiale de 500 mètres aux boulets de tout calibre (*le boulet*

de 3 excepté, dont la bouche à feu n'a que onze calibres), chassés par des charges égales au tiers de leurs poids. A la vérité, la force dynamique de la poudre est plus grande dans les pièces de gros calibre que dans celles de petit calibre. D'un autre côté, les pièces de siége de petit calibre ont moins de vent, et leur longueur d'ame exprimée en calibres est plus grande. Les pièces de campagne n'ont que 17 calibres, mais elles sont *tirées* à boulet ensaboté; ce mode de tir est avantageux aux portées, et conséquemment aux vîtesses initiales.

Nous renvoyons pour les vîtesses initiales des obus, au tableau n.° 1, où l'on trouvera celles que nous avons cru devoir adopter, après avoir consulté les différens auteurs. La plus forte charge de guerre des nouveaux obusiers de 6 pouces et de 24 est fixée au septième du poids des projectiles.

10. Nous avons fait usage des formules de Hutton pour calculer les vîtesses finales à toutes les distances où nous voulions connaître la pénétration. V étant la vîtesse initiale, x la distance et v la vîtesse finale correspondante, on emploie, pour calculer v, la formule qui suit,

$$\log.(v-7051)=\log.(V-7051)-\frac{x}{Dd(2147,85)}\ldots(10),$$

lorsque V surpasse 120 mètres, et l'autre formule suivante,

$$\log. v=\log. V-\frac{x}{Dd(3692,85)}\ldots.(11),$$

lorsque V est moindre que 120 mètres.

On obtient, par ces formules, des valeurs appro-

ximatives des vîtesses finales, qui diffèrent d'autant plus des valeurs exactes de ces vîtesses, que l'angle sous lequel le projectile est lancé est plus grand, et que la distance à laquelle on calcule la vîtesse finale est plus considérable. Ainsi, indépendamment de ce que le principe qui sert de base à la théorie de la pénétration n'est pas rigoureusement exact (1), *les résultats du calcul ne peuvent être que des approximations.*

Quant aux bombes, il suffit de déterminer les limites de leurs vîtesses finales. Elles les acquièrent, à très-peu de chose près, à la fin de leurs chutes, lorsqu'elles ont été lancées à de grandes élévations. Nous les avons calculées par la formule suivante, tirée de Lombard :

$$v = 1361{,}15\sqrt{Dd}\ldots\ldots \qquad (12)$$

11. Reprenons l'équation (6) $e = \frac{Ddv^2}{3gh}$. Soit d' le diamètre d'un autre projectile, D' sa densité, v' sa vîtesse finale à une distance donnée, e' la pénétration correspondante, supposée connue et déterminée par l'expérience. On aura

$$e' = \frac{Dd'v'^2}{3gh};$$

et, en comparant les valeurs de e et e'

$$e = \frac{Ddv^2}{D'd'v'^2}e'\ldots\ldots, \qquad (13)$$

h disparaît. Il résulte de là que, si l'on a calculé, en laissant le dénominateur constant, toutes les

valeurs de $\frac{Ddv^2}{D'd'v'^2}$ qui répondent aux vitesses finales, il suffira de multiplier ces valeurs par e' pour avoir les valeurs réelles des pénétrations. Nous donnons à la quantité e' le nom d'*unité de pénétration*; c'est pour les balles la pénétration *totale* de la balle de munition chassée à la distance de 50 mètres, et pour les boulets, bombes et obus, la pénétration *totale* du boulet de 24 chassé à la distance de 100 mètres. On a pour la balle de munition $D' = 11,188$, $d' = 1^c,64$, et $v' = 38,900$ centimètres; et pour le boulet de 24, $D' = 7,166$, $d' = 14^c,83$, et $v' = 47,900$ centimètres.

Les quantités $\frac{Ddv^2}{D'd'v'^2}$ représentent les rapports des pénétrations. Le tableau n.° 2 en donne toutes les valeurs correspondantes à celles de v contenues dans le tableau n.° 1. Les valeurs de e' seront déterminées dans les chapitres suivans.

Pl. II. 12. On a joint à ce mémoire une planche qui peut tenir lieu, pour les boulets et les obus, de tous les tableaux qui ont été calculés. On a construit sur cette planche les courbes de pénétration de ces projectiles, en prenant, d'après le tableau n.° 2, les distances du tir pour abscisses, et les rapports des pénétrations pour ordonnées. Les distances ou abscisses ont été exprimées à l'échelle de $\frac{1}{2000}$. Les ordonnées, ou rapports des pénétrations, ont été construites à l'échelle faite sur l'ordonnée CD, unité de pénétration à laquelle on a assigné une longueur convenable relativement à la grandeur de la planche. La même longueur CD a servi à la construction des échelles sur lesquelles il

faut porter les ordonnées des courbes pour avoir les valeurs réelles des pénétrations. A cet effet, on a considéré la longueur $C\,D$ comme égale à l'unité de pénétration qui appartient à chaque milieu, d'après l'expérience, et qui est déterminée dans les chapitres suivans.

13. L'examen des formules (6), (10) et (11), conduit à cette proposition assez remarquable, savoir, que lorsque les vîtesses *initiales* de deux projectiles sont égales, leurs vîtesses *finales* et leurs pénétrations sont encore égales à toutes les distances, si l'équation suivante est satisfaite : $D\,d = D'\,d'$. Elle l'est pour le boulet de 24 et l'obus de 8 pouces, pour le boulet de 12 et l'obus de 6 pouces.

CHAPITRE II.

PÉNÉTRATION DANS LES TERRES.

§. I.er *Pénétration des balles.*

14. M. Fourcroy a fait faire, à Calais, dans le mois de septembre 1768, des expériences intéressantes sur la pénétration des balles dans les terres et dans les bois. M. Villeneuve, lieutenant du génie, a bien voulu, à notre prière, faire au 2.e régiment du génie, à Arras, plusieurs expériences qui complètent celles de M. Fourcroy. Nous devons aussi à M. de Cazaux, chef de bataillon au 8.e régiment d'artillerie à pied, à Toulouse, quelques résultats d'expériences sur la pénétration des balles, que nous ferons connaître.

Mémoire de quelques expériences du fusil de munition, par M. FOURCROY.

« Toutes les expériences suivantes ont été faites » avec un excellent fusil de munition du calibre de » 16 balles à la livre, et de la longueur de 43 pouces » 7 lignes, mesurée dans le canon.

» Ce fusil fut chargé avec soin, pour chaque coup, » d'une balle de plomb d'une once et de trois gros et » demi de poudre de guerre très-bonne. Cette charge » est de quatre grains moins pesante que celle réglée » pour le coup de munition ordinaire des 36 à la livre » de poudre; mais nous avons estimé ces charges » égales en force, attendu l'attention à bien charger » et bourrer tous nos coups, et à entretenir le fusil » propre, ce qui se fait rarement à la guerre.

» Tous les coups ont été tirés de la distance de » neuf pieds, mesurée du bout du fusil à la surface du » but atteint par la balle, sauf quelques exceptions » qui seront indiquées.

» Chaque expérience a été répétée nombre de fois; » on en rapporte ici, non la réduction, mais les plus » grands effets de trois ou quatre coups à peu près » uniformes dans chaque espèce, c'est-à-dire, qui » ne différaient entre eux que d'un pouce, pour le » plus, par leur enfoncement dans les terres.

EXPÉRIENCES DANS DES TERRES DE DIFFÉRENTES ESPÈCES.

1.° *Sables et terres douces mêlées de sable ou les plus légères.*

Progrès des balles.

» 1. Dans une dune de sable de mer fort » sec, présentant un plan vertical au tir du fusil. 3 p° $\frac{1}{2}$.

Progrès des balles

» 2. Dans un sac de toile forte, rempli du » même sable non entassé et sans précaution. 3 ½.

» 3. Dans un tas du même sable humecté » par la pluie..... 4.

» 4. Dans un sac de toile forte, rempli du » même sable humecté, non entassé..... 4.

» 5. Ces sacs avaient, étant remplis, sept pouces » de diamètre et dix-huit pouces de hauteur, étaient » posés debout, et n'ont pas été renversés par les » coups de fusil. On y voyait, à l'entrée de la balle, » une petite dépression ou enfoncement peu sensible » autour de l'orifice du trou.

» 6. On a tiré plusieurs chandelles calibrées et » raccourcies au poids d'une once, au lieu de balles (en » sorte qu'elles avaient cinq à six pouces de longueur), » avec le même fusil, aux mêmes distances, et dans » les mêmes sables ; elles ont pénétré à la même » profondeur que les balles, mais en faisant des trous » beaucoup plus larges. On retrouvait environ un cin- » quième du suif au fond des trous. Le reste avait été » disséminé dans le sable en parties invisibles, mais » que l'on reconnaissait à l'odeur du sable.

» 7. On a remarqué que toutes les balles tirées » dans le sable se trouvent fort élargies et figurées » en calottes, c'est-à-dire, convexes par le côté qui a » frappé le sable, et fort concaves du côté du fusil; » que les bords en sont devenus fort minces, garnis » de déchirures et ébarbures fort irrégulières, qui ont » jusqu'à neuf lignes de longueur ; que la partie con- » cave se trouve recomblée de sable entassé, fort adhé- » rent, fort dur, et presque aussi fin que s'il avait été

» porphyrisé ; enfin, que la partie convexe est tout » inégale, raboteuse, souvent écorchée et déchirée, » et, par conséquent, la plupart des balles diminuées » de leur poids.

Progrès des balles.

» 8. Dans un tas de sable mêlé d'un peu de » terre végétale ou fertile, mouillée par une » forte pluie, et nouvellement remuée..... 10 pc.

» 9. Dans un sac à terre de munition, d'en- » viron onze pouces de diamètre, et rempli du » même sable..... 10.

» 10. L'un de ces sacs fut décousu par l'im- » pulsion de la balle, quoique la couture fût » latérale par rapport à la direction du coup, » et le sable en sortit avec projection.

» 11. Dans une terre franche ou fertile, » mêlée d'un peu de sable, très-anciennement » relevée d'un fossé et fort sèche..... 5.

» 12. Dans la même, également rassise, » mais humectée par la pluie..... 9 ½.

» 13. Dans la même, relevée au louchet » et mise en parapet sur le champ, cette terre » fort abreuvée par la pluie..... 15.

» 14. Un sac à terre de munition, rempli de » cette dernière, fut percé de part en part, et » presque toute sa couture fut détruite avec » projection de la terre qu'il contenait, à plus » d'un pied de distance.

2.° *Glaises, argiles, terres à four ou terres de la plus forte consistance.*

» 15. Dans une glaise à potier, vierge ou » non remuée, et très-peu humide..... 15.

Progrès des balles.

» 16. Dans la même, abattue sur le champ et mise en tas..... 20 pieds.

» 17. Dans deux sacs à terre de munition, jointifs et remplis de la même terre..... 20. "

» 18. Dans la coupe à plomb d'un gros tas de la même terre, remuée depuis environ un mois, et fort humectée par les pluies pendant quinze jours..... 27.

» Chaque balle y fit un trou conique de dix à onze lignes de diamètre à son entrée, et du diamètre de la balle seulement à trois ou quatre pouces du fond.

» 19. Dans trois sacs à terre de munition jointifs, remplis de la terre de ce dernier tas. 27.

» 20. Le sac à terre le plus près du fusil, dans ces deux dernières expériences, fut toujours déchiré du haut en bas par l'entrée de la balle, avec projection de la terre au pied du sac.

» 21. Les balles tirées dans ces argiles ou glaises pures étaient retrouvées de forme hémisphérique, c'est-à-dire, aplaties sur une face, et en demi-sphère par l'autre face.

» 22. Dans un mélange naturel d'environ moitié glaise ou argile peu humide, et moitié terre franche des champs, ce que les cultivateurs appellent *terres fortes*, non remué.... 14.

» 23. Dans le même, relevé en parapet sur le champ..... 17.

» 24. Dans une terre fertile, très-douce et fine au toucher, mêlée d'argile, relevée de deux ans, et plus sèche qu'humide..... 15.

Progrès des balles

» 25. Dans un parapet fort anciennement » formé de cette même terre, et dépouillé de » son gazon jusqu'aux racines, *à la distance de* » *quinze toises*..... 9^pe.

» 26. Dans une terre à four, jaune, de » forte consistance, à un endroit fort sec et » non remué..... 7.

» 27. Dans la même, à un endroit un peu » humide..... 8.

» 28. Dans la même, nouvellement re- » muée et sèche..... 13.

» 29. Dans la même, nouvellement re- » muée et un peu humide..... 14.

» 30 (1). Les sacs à terre de munition, » remplis de la même terre, tantôt sèche, tantôt » un peu humide, ne furent pas percés de part » en part, mais il s'en fallut peu.

» 31. Dans la même, un peu noire par son » mélange avec un peu de terre fertile, en partie » détrempée par la pluie, et mise sur le champ » en parapet de quatre pieds d'épaisseur.... 16.

3.° *Terres franches ou végétales et mélangées.*

» 32. Dans une terre franche et noire de » prairie, sans herbes ni racines, non remuée. 14.

» 33. Dans un parapet de quatre pieds,

(1) Ces faits, 25—31, prouvent qu'un pied de terre bien battue et foulée peut soutenir un coup de mousquet (Fritach, *Archit. milit.*, page 146), mais que l'on ne peut pas considérer les sacs à terre, qui n'ont que 24 à 27 centimètres de diamètre (Saint-Paul, *Traité de fortification*, tom. I.^er, page 171), comme étant à l'épreuve de la balle à bonne portée dans les siéges.

Progrès des balles

» formé de terre fertile, bien imbibé par les » pluies, et presque en mortier..... 31 Po.

» 34. Dans une terre fertile, mêlée d'environ moitié craie ou menues pierres tendres, » rassise de vieux et un peu humide..... 8.

» 35. Dans la même nouvellement remuée. 13.

» 36. Les sacs à terre, remplis de terre des » champs sèche, ne furent pas percés de part en » part, parce qu'ils étaient appuyés contre un » plan vertical dans lequel les balles s'imprimèrent sans percer la toile des sacs.

» 37. Toutes les balles tirées dans les terres » douces, soit végétales pures, soit mêlées avec » l'argile, ont été trouvées transformées en calottes plus ou moins concaves, et recomblées » d'une portion de terre fort entassée et dure, » adhérente à la concavité.

4.° *Menus cailloux.*

» 38. Dans une coupe à plomb de menus » cailloux roulés ou de mer, n'ayant pas $\frac{1}{10}$ de » terre franche, non remués..... 2.

» 39. Dans un tas du même mélange remué » exprès..... 3.

» 40. Dans un mélange d'environ moitié de » ces cailloux et moitié de terre noire de prairie, » non remué..... 3.

» 41. Dans un tas du même mélange remué » exprès..... 5 $\frac{1}{2}$.

» 42. Dans ces expériences, on n'a retrouvé au » fond des trous que de petites parties des balles; et » même, dans celles des cailloux remués, on n'a pu

» juger de la pénétration des balles que par quelques » cailloux réduits en poussière au fond des trous.

5.° Gazons verts et secs ; foins.

Progrès des balles.

» 43. Dans la couche du parapet du n.° 25, » occupée par le chevelu et les racines du » gazon, à la distance de 15 toises..... 20$^{p°}$.

» 44. Dans un tas de gazons enlevés dans des ma- » rais par morceaux de 5 à 6 pouces en carré et autant » d'épaisseur, desséchés à l'air et rangés sur 8 pieds » d'épaisseur pour être brûlés en détail dans les che- » minées, les balles ont percé de part en part.

» Comme les morceaux de ce gazon n'étaient pas » serrés les uns contre les autres, on a suivi les traces » des balles à travers le tas, et l'on a estimé le vide » total qui s'y trouvait à $\frac{1}{6}$ au plus fort. Mais, entre les » balles qui l'ont traversé, l'une est encore entrée de » 3 pouces dans un saule vivant qui était derrière; et » une autre a encore pénétré de 18 pouces à travers » et sous un gazonnage vif de marais, où elle s'est » enterrée.

» 45. D'autres balles ont traversé un tas de foin » nouveau, mis en meule de 5 pieds d'épaisseur, et » sont encore entrées d'un pied dans un revers de fossé » de terre fertile qui était derrière. »

D'après d'autres expériences, la pénétration des balles tirées à la distance de 50 mètres est de 12 centimètres dans les briques crues, et de 7 centimètres dans les briques cuites.

Conséquences des expériences dans les terres.

« On croit pouvoir distinguer toutes les différentes » terres de ces expériences en trois espèces, relati-

» vement à leur résistance contre les coups de fusil » de munition.

» 46. 1.° Les sables purs (n.os 1 et 3) et les menus » cailloux, même mêlés avec au moins moitié de terres » douces (n.os 38—41), sont la meilleure espèce : » et, comme les balles de plomb s'écrasent et se dé- » chirent contre les corps durs, il n'y a aucun danger » que les cailloux en soient enlevés ou jettent des » éclats contre les gens qui seraient derrière un parapet » de cette espèce. Un pied d'épaisseur de ces matières » serait à toute épreuve contre les coups de fusil.

» 47. 2.° Plus les terres sont naturellement douces, » fines, molles et susceptibles de s'imbiber d'eau, » comme les glaises ou argiles, les terres à four et » toutes les terres fertiles, et plus aisément elles se » laissent pénétrer par les balles, sur-tout lorsqu'elles » sont actuellement humides : en sorte que les terres » nommées *fortes* ou *argileuses*, humides et sans mé- » lange de sable, gravier, craie ou pierrailles, seraient » de la plus mauvaise espèce à mettre en parapets. » Il en faudrait trois pieds pour être à toute épreuve » contre les coups de fusil.

» 48. 3.° Tous les mélanges de cette seconde espèce » de terres, soit avec le sable, soit avec d'autres corps » durs, comme menues pierrailles, gravier, même la » craie ou le tuf, forment une troisième espèce de » terre mitoyenne entre les deux premières, et à la- » quelle il suffirait de donner deux pieds d'épaisseur » pour résister aux coups de fusil.

» 49. Les racines ou le chevelu du gazon rendent » la terre qui le produit beaucoup moins dense qu'elle » ne le serait sans cette production, qui est elle-même

» une matière molle ; ces racines s'opposent au pro-
» grès des balles beaucoup moins que cette terre ne le
» ferait sans mélange (n.os 25 et 43). Ainsi un parapet
» tout construit de gazons verts serait encore l'un des
» plus mauvais, parmi ceux auxquels il faut bien au
» moins trois pieds d'épaisseur.

» 50. Quant à des gazons secs et à du foin, on
» voit (n.os 44 et 45) qu'il ne faudrait se fier à ces
» matières qu'à de grandes épaisseurs pour se garantir
» des coups de fusil.

» 51. Les sacs à terre de munition étant le plus
» ordinairement remplis de terre fertile ou douce prise
» à la surface des champs (n.os 9, 14, 17, 19, 30
» et 34), et qui, de plus, s'imbibe aisément par les
» pluies, ne sont point du tout à l'épreuve. Du sable
» bien pur (n.os 2 et 4) serait tout ce qui conviendrait
» le mieux pour garantir, par un seul sac à terre, la
» tête d'une sentinelle. Au défaut de ce sable, il con-
» viendrait fort de multiplier les sacs à terre à chaque
» créneau de sentinelle, jusqu'à deux et trois sacs
» d'épaisseur contre la direction et suivant la proxi-
» mité des coups de fusil, selon la nature de la terre
» dont on aurait à les remplir. »

Ici finit la partie du mémoire de M. Fourcroy, qui traite de la pénétration dans les terres. Nous passons aux expériences de M. de Cazaux, qui nous serviront à calculer la valeur de h et l'unité de pénétration.

15. M. de Cazaux a fait ses expériences avec un fusil d'infanterie ; il pesait exactement toutes les charges et les mettait en totalité dans le canon ; il

amorçait (1) avec une autre poudre. Il plaçait la balle immédiatement sur la charge, et ajoutait une légère bourre sur la balle. La distance du but était de quatre mètres; les terres étaient légères et remblayées depuis dix ans; elles avaient été passées à la claie et damées, et présentaient au tir un parement vertical.

M. de Cazaux fit varier les charges, ce qui revient à faire varier les distances en laissant la charge constante. Nous avons ajouté, dans le tableau ci-dessous, aux charges et aux pénétrations déterminées par l'expérience, les vîtesses qui répondent aux charges employées par M. de Cazaux, et les distances qui répondent à ces vîtesses en partant de la charge constante de $\frac{1}{2}$.

Charges....	$\frac{1}{2}$,	$\frac{3}{8}$,	$\frac{1}{4}$,	$\frac{3}{16}$,	$\frac{1}{8}$,	$\frac{1}{16}$.
Pénétrations.	18^c,	19^c,1,	24^c,6,	26^c,5,	20^c,4,	12^c,4.
Vîtesses....	500,		389,		308,	202.
Distances...	4,		50,		100,	200.

Plus les charges étaient fortes, plus les balles étaient aplaties ou déformées; à partir de la charge $\frac{3}{16}$, la balle était peu déformée; la balle chassée par la charge de $\frac{1}{8}$ l'était moins encore, et celle chassée par la charge de $\frac{1}{16}$ ne l'était point du tout. Or, lorsque la forme des balles change pendant la pénétration ou n'est pas la même dans les épreuves, la résistance qu'elles éprouvent n'est pas constante, et

(1) On évalue à 0^{gr},64, un vingtième de la charge, la quantité de poudre nécessaire pour amorcer.

doit être d'autant plus grande qu'elles sont plus aplaties. Puisque la balle conservait sa forme sphérique lorsque la charge était de $\frac{1}{16}$, on peut se servir des résultats de cette expérience pour calculer la résistance constante d'après la formule $h = \frac{Ddv^2}{3ge}$; donnant à D, d et g leurs valeurs, et faisant $v = 20200$ centimètres, $e = 12^c,4$, on trouvera $h = 2002$ mètres.

Maintenant, pour déterminer l'unité de pénétration ou la pénétration qui aurait lieu à la distance de 50 mètres, *si la balle restait sphérique*, on fera $v = 38900$ centimètres, $h = 200200$ dans la formule $e = \frac{Ddv^2}{3gh}$; on trouvera $e = 46$ centimètres. Tel est le facteur par lequel on doit multiplier les rapports des pénétrations aux distances qui surpassent 200 mètres, pour avoir les valeurs réelles des pénétrations à de telles distances. On aura recours à l'expérience pour connaître les pénétrations aux distances moindres de 200 mètres.

§. II. *Pénétrations des boulets, bombes et obus.*

16. On n'a pas encore entrepris une suite d'expériences (1) qui ne laissent rien à desirer sur la pénétration des boulets et des obus de tous les calibres dans les différentes espèces de terres : c'est pourquoi nous rapporterons ici quelques passages

(1) M. d'Obenheim a indiqué une manière de procéder à des expériences décisives sur l'enfoncement des projectiles, dans l'ouvrage qu'il a publié à Strasbourg, en 1814, sous ce titre : *Indication de quelques expériences pour compléter la théorie du mouvement des projectiles.*

d'une note écrite en 1768 par M. Fourcroy sur ce sujet.

« Quoique la qualité des terres soit fort variée à certains égards, on croit pouvoir la diviser en deux espèces seulement, relativement à la résistance qu'elles paraissent devoir opposer au progrès des boulets chassés par le canon des différens calibres; savoir, en terres molles et en terres dures.

» On comprend dans la première espèce toute terre productive de la surface des champs, bois, marais ou prairies, avec toute espèce de glaises ou d'*argiles*, et encore toutes ces mêmes terres mêlées de *sable*, craie ou tuf, gravier ou menues pierrailles, mais en quantité non prédominante.

» On comprend dans la seconde espèce les sables, le tuf ou la craie, les graviers et menues pierrailles, et tous leurs mélanges dominans avec les terres molles quelconques de première espèce.

» Il est à remarquer, sur cette division des terres, que l'on a communément regardé jusqu'ici comme les plus capables de résister aux efforts du canon, celles que l'on appelle vulgairement *terres fortes*, ou de forte consistance, c'est-à-dire, les terres glaiseuses ou argileuses, les terres à four, toutes celles propres au placage, ou qui se soutiennent aisément et long-temps à un *talus* fort roide, à cause de leur ductilité, finesse et ténacité. On a estimé au contraire les moins bonnes contre le canon, celles que l'on nomme *terres légères*, c'est-à-dire, le sable même ou les terres sablonneuses et sans consistance, même étant humides, ou qui prennent naturellement un grand talus et s'éboulent aisément si on les forme sur un talus plus roide.

Mais quantité d'expériences faites avec un fusil de munition paraissent indiquer tout le contraire de cette opinion et fournir nécessairement la division proposée ci-dessus. C'est aux expériences du canon faites exprès, à vérifier cette conjecture.

» On demande que, pour ces expériences, les terres de parapet ne soient point battues à la dame (1), mais simplement relevées et jetées à la pelle, et rassises ou reposées depuis le moins de temps possible, ou de trois à quatre mois pour le plus; que la face du parapet contre laquelle on tirera, soit toujours formée à terres coulantes, sans aucun revêtement ni autres précautions que d'être bien dressée au talus naturel de ces terres; et que cette face soit terminée à ses deux extrémités par des lambourdes au même talus, pour pouvoir, en tendant un cordeau le long de la face, mesurer exactement l'enfoncement des boulets. »

17. On a fait à Saint-Omer, dans le mois de septembre 1799, par ordre du ministre de la guerre, des expériences de pénétration sur trois sortes de terres, et avec le boulet des cinq calibres le plus en usage. La qualité de la poudre et la charge des bouches à feu ne sont pas désignées dans le procès-verbal; mais tout porte à croire qu'on a employé la poudre et la charge ordinaires de guerre. Voici le résultat de ces expériences:

(1) M. Fourcroy avait principalement en vue l'application aux fortifications de campagne.

NATURE DES TERRES et distances.	N.os des COUPS.	PIÈCES DE 24.	16.	12.	8.	4.
		mètres.	mètres.	mètres.	mètres	mètres.
Terres vierges, à la distance de 142 mètres.	1.er	2,90.	2.	(1)0,63	2,60.	1,45.
	2.e	3,32.	2,50.	3,22.	2,55.	" (2)
	3.e	(1) 1,60.	(1) 1,08.	2,72.	2,62.	1,45.
	4.e	3,70.	3,70.	3,76.	" (2)	1,95.
Terres de parapet ancien, à la distance de 117 mètres.	1.er	" (2)	2,90.	3,20.	2,76.	" (2)
	2.e	4,20.	3,78.	3,23.	2,76.	1,95.
	3.e	4,36.	3,95.	3,25.	2,27.	1,95.
	4.e	3,87.	3,47.	3,23.	1,95.	1,45.
Terres fraîchement remuées, à la distance de 105 mètres.	1.er	5,50.	3,40.	4,70.	3,20.	2,45.
	2.e	5,15.	4.	3,40.	3,25.	1,95.
	3.e	5.	4,10.	3,70.	3,20.	2,25.
	4.e	5,40.	" (2)	3,55.	" (2)	2,25.

(1) Ces trois coups ont été tirés au pied du but, où la terre vierge devient une espèce de tuf très-dur.

(2) Les boulets dont on ne donne pas l'enfoncement, n'ont pas été retrouvés.

18. *Terre vierge.* On doit aussi à Belidor et à Cormontaingne quelques résultats d'expériences qui sont cités dans plusieurs ouvrages.

Dans les expériences de Belidor, la distance étant de 50 mètres, et la charge de 9 livres, le *maximum* de pénétration du boulet de 24 fut de 4 mètres dans les terres vierges, douces et humides, de 3

mètres dans les sables durs et graveleux, et de 2 mètres dans les sables durs et pétrifiés.

Cormontaingne fit ses expériences à Metz, contre les escarpemens du rideau de la Chenau, dont les terres sont de la plus forte consistance. Les résultats de ces expériences, réitérées maintes fois (*Mém.* de Corm.), furent toujours les mêmes. Le boulet de 24, chassé à la distance de 40 mètres par une charge de 16 livres de poudre, s'enfonça de $3^{m},57$; chassé par une charge de 10 livres de poudre, il s'enfonça de $2^{m},91$. Cormontaingne ajoute, comme fait reconnu ailleurs, que le même boulet, chassé par une charge de 16 livres, pénètre jusqu'à $4,^{m}22$ de profondeur, dans les terres de moyenne consistance, et jusqu'à $4^{m},90$ dans les terres legères, comme le menu sable et le *terreau de prairie.* Ces résultats ont été adoptés par plusieurs auteurs, Gassendi, Saint-Paul, &c.

19. *Terre de parapet ancien.* Les pénétrations des boulets de même calibre (expériences de Saint-Omer) diffèrent peu entre elles. Si l'on calcule, d'après la théorie, pour la distance de 117 mètres, les pénétrations des boulets de 24, 16, 8 et 4, sur celles du boulet de 12 (ce sont celles qui approchent le plus d'être égales), et qu'on les compare aux pénétrations moyennes déterminées par l'expérience, à la même distance, on aura :

Projectiles.....	24,	26,	8,	4.
Pénétrations calculées...	4,26,	3,60,	2,72,	2,00.
Pénétrations moyennes..	4,14,	3,52,	2,44,	1,79.
Différences.....	0,12,	0,08,	0,28,	0,21.

Ces différences ne sont pas considérables. D'après ces expériences, l'unité de pénétration, ou la pénétration du boulet de 24, à la distance de 100 mètres, serait égale à $4^{m},40$. Le calcul des expériences de Cormontaingne conduit au même résultat.

20. Suivant cet ingénieur (*Mémorial de fortific. perm.* pag. 35, 2.e édit.), le boulet de 24, chassé à la distance de 40 mètres par une charge de 16 livres, pénètre de $4^{m},55$ dans un parapet anciennement fait des terres de la plus forte consistance, et ne pénètre (n.° 18) que de $3,^{m}57$ dans les mêmes terres vierges, parce que, dit Cormontaingne, dans ses mémoires, les buttes de terre vierge ont toujours plus de consistance et opposent plus de résistance dans leur intérieur que les parapets formés des mêmes terres. Cormontaingne distinguait trois sortes de terres : les terres fortes, dont le talus naturel, (celui qui résiste au canon), est 1 ; les terres de moyenne consistance, dont le talus naturel est $\frac{4}{3}$; et les terres légères, dont le talus naturel est $\frac{3}{2}$.

Charges.	Distances.	État des terres.	Fortes.	Moyennes.	Légères.
16 livres.	40 mètres.	Vierge.	3,57.	4,22.	4,90.
Idem.	*Idem.*	Remblayées.	4,55.	5,40.	6,20.
20 livres.	100 mètres.	*Idem.*	3,60.	4,40.	5,00.

21. On lit ce qui suit dans la nouvelle édition de Bousmard, celle *in-8.°* (tom. III, p. 270, note) : « Des épreuves comparatives, faites par cet ingénieur (Cormontaingne) et par Belidor, en 1740, » répétées en 1786 (il faut lire 1768) par M. de » *Fourcroy*, et en 1793 (il faut lire 1795 et 1796),

» dans une de nos places de guerre, ont constaté que » le boulet ne pénètre que de 3 à 4 mètres au plus » dans les terres. Elles ont donné lieu à une autre » remarque contraire à l'assertion de Cormontaingne; » c'est que l'enfoncement du boulet est moindre » dans les terres sablonneuses et inconsistantes, que » dans les terres fortes. Cet effet a été également » observé par le général d'Arcon, dans les tran- » chées de Gibraltar. »

22. Après les épreuves des batteries blindées, qui eurent lieu à Saint-Omer à la fin des années 1795 et 1796, on procéda à la recherche des boulets pour connaître leur enfoncement dans les masses de la fortification où ils avaient pénétré. Voici quelles furent les pénétrations du boulet de 24, rapportées à une distance de 100 mètres.

Terres de tuf, fraîchement remuées et mêlées de décombres : trois coups très-inégaux, $2^{m},40$, $2^{m}60$ et $3^{m},90$.

Terres de tuf, mêlées de sable et fraîchement remuées pour les épreuves : un seul coup, $3^{m},47$.

Terres de tuf mêlées de tourbe et remuées depuis deux ans : un seul coup, $3^{m},57$.

Terres anciennement rapportées, bien sèches, solides, assez pesantes, glaiseuses, et mêlées d'un peu de décombres : moyenne de sept coups peu différens, $3^{m},30$.

Il résulte des expériences les plus récentes, que l'unité de pénétration dans les parapets varie de $3^{m},30$ à $4^{m},40$. Nous la fixons à 4 mètres; hypothèse qui donne $h = 1900$.

23. Il est très-important de savoir si les terres

fortes et compactes opposent moins ou plus de résistance à la pénétration des boulets, que les terres sablonneuses et inconsistantes. Suivant Deville (édit. *in-f.°*, pag. 304), « le sable et le fumier mêlés sont » excellens pour remplir les gabions; car ils font » un corps tellement résistant, que le canon ne » percera pas tant la moitié que s'ils étaient pleins » de terre; chose bien éprouvée. »

Cependant M. Fourcroy (n.° 16) ne regardait pas cette question comme résolue par les expériences qu'il avait faites, en 1768, sur la pénétration des balles. Il souhaitait qu'on fît des expériences sur la pénétration des boulets dans les terres et dans les sables. Le fait suivant, observé par le général d'Arcon (*Conseil de guerre privé sur Gibraltar, pour servir d'exercice sur l'art des siéges*, page 196), est encore en faveur de la forte résistance des sables. « Il est » utile de remarquer ici un fait de détail, qu'on ne » devinerait pas sans le secours de l'expérience; c'est » que de toutes les espèces de terres employées dans » les retranchemens, aucune ne présente autant de » résistance à la percussion du boulet, que ce sable » inconsistant et coulant des bords de la mer, tel que » celui de l'isthme de Saint-Roch. Il a l'inconvénient de ne pouvoir masser les sommets par son » extrême disposition à couler comme un fluide; » mais en réparant ce défaut par des sacs, on obtient » de meilleurs parapets et à moindre épaisseur qu'a- » vec les terres fortes. »

On ne peut pas se refuser à admettre, après ces faits, que la résistance à la pénétration est plus grande dans les sables que dans les autres terres. Il

serait utile de faire des expériences pour déterminer exactement l'enfoncement des projectiles dans les milieux qui en seraient formés.

24. L'unité de pénétration dans les terres nouvellement remblayées doit varier, en raison de la nature des terres, de la manière dont elles ont été remblayées, et du temps qui s'est écoulé jusqu'à l'époque des expériences; elle a varié de 5 mètres à $5^{m},50$ dans les épreuves de Saint-Omer. « Il est d'ex- » périence (Bousmard, tom. III, pag. 270) qu'un » boulet de 24, tiré de 117 à 156 mètres de dis- » tance dans des terres nouvelles, quelque douces » et bien damées qu'elles puissent être, y pénètre » d'environ $4^{m},90$. » Ainsi l'on ne peut pas fixer à moins de 5 mètres l'unité de pénétration dans ces terres; ce qui donne $h = 1520$. L'unité de pénétration serait sans doute plus considérable dans les terres nouvellement remblayées sans avoir été damées. La théorie ne peût guère être appliquée à cette nature de terres.

Les tableaux n.^{os} 3 et 4 ont été calculés d'après les unités qui viennent d'être fixées.

§. III. *Remarques sur l'effet des projectiles.*

25. La pénétration du boulet de 24 dans les terres de parapet, qui répond à la distance de 1,000 mètres, est d'un mètre (tableau n^{o} 3). Cormontaingne, qui était également parvenu à ce résultat par le calcul, en concluait que, de la distance de 1000 mètres des ouvrages d'une place, on pouvait ruiner tous les gazonnages des talus extérieurs des parapets,

déraciner les fraises qui y sont plantées, et lesquelles ne sont enfoncées que d'un mètre; enfin, causer l'éboulement de tous les talus extérieurs qui ne seraient pas à terres roulantes.

26. Bousmard a exagéré l'effet que peuvent produire dans les terres les projectiles creux; cependant, on ne peut pas nier que ces projectiles y fassent l'effet de fougasses. Ainsi avec le boulet creux de 24, qui peut contenir 16 onces de poudre, 6 suffisant pour le faire éclater, l'explosion serait produite par une charge de 10 onces (1): avec l'obus de 8 pouces, qui contient, étant plein, 65 onces de poudre, seize suffisant pour le faire éclater, l'explosion serait produite par une charge de 49 onces. Il faut ajouter environ 1^{m} 10 aux pénétrations des obus de 24 et de 6 pouces, et 2 mètres aux pénétrations de l'obus de 8 pouces, pour avoir les limites de profondeur auxquelles ces obus, supposés *pleins de poudre*, peuvent étendre leurs effets dans les terres de moyenne consistance. Au-delà de ces limites, les entonnoirs sont invisibles; l'effet dû à l'explosion des obus est comme nul.

Le tableau n.° 6 présente ces limites mises en parallèle avec les pénétrations du 24 et du 12. On y voit que, d'après l'épaisseur qu'on a coutume de donner aux parapets, leur talus intérieur n'a pas à redouter l'explosion des obus : mais l'explosion de

(1) La force de la portion de charge qui fait éclater le projectile subsiste après cet effet, et l'on doit la comprendre dans l'effet d'explosion; c'est-à-dire qu'il faut assimiler la charge entière du projectile à celle d'un fourneau de mine, sans prélever, du moins en totalité, la partie de poudre nécessaire pour le faire éclater.

ces projectiles peut produire son effet contre les plongées, contre le talus intérieur, et, à la longue, ruiner tout le parapet. C'est sur-tout dans l'attaque des fortificationsqu'on ne peut ricocher (*Mémorial de fortific. perm.* p. 257), que les obus et les bombes sont nécessaires pour ruiner les parapets qui ne seraient qu'effleurés ou écrêtés par les boulets tirés de plein fouet. Mouzé rapporte (*Traité de fortific. sout.* pag. 115) que ces projectiles ont été employés avec succès, pour produire cet effet, aux siéges de Mayence et de Valenciennes, en 1793. Les obus, en outre, rendent promptement les talus en terre plus accessibles qu'ils ne le sont naturellement.

CHAPITRE III.

PÉNÉTRATION DANS LES BOIS.

27. L'emploi du bois dans l'architecture militaire, et sur-tout dans l'architecture navale, a exigé depuis long-temps que l'on cherchât à connaître par expérience l'effet et la pénétration des projectiles dans les constructions en bois. La résistance à la pénétration n'est pas égale dans tous les bois, ni dans les bois de même essence, parce que chaque nature de bois se subdivise en espèces qui jouissent de propriétés différentes; elle varie encore selon l'âge et l'état du bois, et selon la direction dans laquelle les projectiles rencontrent les fibres.

§. I.er *Pénétration des balles.*

SUITE DU MÉMOIRE DE M. FOURCROY.

Expériences dans différentes espèces de bois.

« Tous les bois des expériences suivantes étaient » coupés depuis plus d'un an, et assez secs. Du reste, » elles ont été faites comme les précédentes (1), et les » trois ou quatre coups de chacune n'ont différé entre » eux que d'un demi-pouce au plus par le progrès » des balles, dont on rapporte ici le plus fort.

Progrès des balles.

» 52. Dans le cœur d'un gros tronc de chêne, au milieu de sa coupe transversale ou suivant le fil du bois..... 2p° 3/5.

» 53. Dans le même tronc, en tirant de la circonférence vers le centre..... 3.

» 54. Dans des madriers de chêne de quatre pouces d'épaisseur..... 3 1/2.

» 55. Des madriers de chêne de 3 pouces ont été percés de part en part;

» 56. On a tiré quelques chandelles comme celles citées (n.° 6 du *Mémoire*, page 97), contre deux feuillets de chêne, chacun de 18 lignes d'épaisseur et tous deux dressés contre une coupe à plomb de sable sec des dunes. Ces deux feuillets ont été percés à chaque coup d'un trou irrégulier

(1) A la distance de 3 mètres, mesurée du bout du fusil à la surface du but atteint par la balle.

Progrès des balles.

de 18 lignes dans sa plus grande largeur.

» 57. Dans des pièces d'orme de cinq pouces » d'épaisseur..... 4 p°

» 58. Dans des pièces de hêtre de quatre » pouces d'écarrissage..... 3.

» 59. Dans de semblables pièces de » charme..... 2 1/2.

» 60. Dans de semblables pièces de pom- » mier..... 3.

» 61. Dans de semblables pièces de frêne. 3 1/2.

» 62. Dans des pièces de saule de six » pouces d'écarrissage..... 5.

» 63. Dans quatre planches jointives de » peuplier de Flandre, chacune de deux » pouces d'épaisseur..... 7.

» 64. Dans cinq feuillets de sapin jointifs, » et ayant ensemble quatre pouces trois quarts » d'épaisseur; ils ont été percés de part en » part.

» 65. Dans huit des mêmes feuillets ayant » ensemble sept pouces un quart d'épaisseur. 7.

» 66. Dans des poutrelles de sapin de sept » pouces d'épaisseur..... 6 1/3.

» 67. Dans des poutrelles de bouleau de » sept pouces d'épaisseur..... 6 1/3.

» Ces poutrelles de sapin et de bouleau se sont, » en outre, trouvées fendues par le derrière, avec » des bosses qui indiquaient que la balle n'était pas » loin de cette surface.

» 68. Les balles tirées dans le sapin se sont trou- » vées aplaties et élargies en forme lenticulaire ou

» convexe par les deux surfaces. Toutes celles ti-
» rées dans les autres bois étaient transformées en
» calotes comme celles tirées ci-devant dans les
» terres douces; mais dans le frêne, elles avaient été
» déchirées et déformées comme dans le sable ; dans
» l'orme, moins défigurées. »

Conséquences des expériences dans les bois.

69. On peut conclure de ces épreuves que des poutrelles de chêne de 6 pouces d'épaisseur sont effectivement à l'épreuve du coup de fusil de munition, comme on le croit communément, et même qu'au besoin elles seraient encore suffisantes à 5 pouces.

70. Que l'orme, le hêtre, le charme et le frêne sont aussi de très-bons bois au même usage, et n'exigent pas plus d'épaisseur que le chêne.

71. Mais que pour le peuplier, le sapin et le bouleau, il conviendrait de donner aux bois 10 à 12 pouces d'épaisseur pour être assuré de leur résistance aux coups de munition. »

28. Les expériences postérieures à celles de M. Fourcroy ont donné les mêmes résultats; nous ne les rapporterons pas. L'orme est, en général, un peu moins dur que le chêne; suivant Hutton, les résistances de ces deux bois sont dans le rapport de dix-sept à dix-neuf. La résistance à la pénétration du bois de sapin paraît être moitié de celle du chêne, d'après les expériences de M. Fourcroy. Le tilleul offre encore moins de résistance à la pénétration que le sapin, d'après celles de M. Villeneuve.

Il est constant, d'après toutes les expériences, qu'un madrier en chêne de 10 centimètres d'épaisseur est à l'épreuve du coup de munition à bout portant. Mais lorsque les bois n'ont que l'épaisseur strictement nécessaire pour être à l'épreuve, ils finissent par être percés après un petit nombre de coups, parce que les premières balles les font fendre. C'est sans doute pour parer à cet inconvénient que M. Fourcroy fixe à 13 centimètres au moins l'épaisseur des poutrelles de chêne à l'épreuve.

29. La pénétration des balles dans le bois n'a pas présenté à M. de Cazaux la même anomalie que la pénétration des balles dans les terres (19) (1). Les balles de plomb pénètrent d'autant plus avant dans le bois qu'elles ont reçu une plus grande vîtesse : néanmoins elles ne conservent pas leur forme sphérique ; elles se déforment plus ou moins et s'aplatissent même quelquefois ; cet effet a lieu à toutes les distances. A 400 mètres, les balles n'ont plus qu'une vîtesse finale de 100 à 120 mètres ; elles font sur les bois durs une impression qui n'est pas appréciable, et quelquefois se réfléchissent à la surface des bois. Il résulte de ces observations que, la forme des balles n'étant pas sphérique pendant la pénétration, et n'étant pas la même dans chaque expérience, la résistance n'est jamais constante et ne peut pas être calculée par la formule $h = \frac{Ddv^2}{3ge}$. Il en est de même de l'enfoncement ; il ne peut

(1) Cela doit tenir à ce que les résistances latérales sont beaucoup plus grandes, par rapport à la résistance du devant de la balle, dans le bois que dans les terres.

pas être calculé par la formule ordinaire. Les nombres qui tiennent la place des pénétrations des balles dans le tableau n.° 5, sont des approximations un peu incertaines; mais on a rassemblé dans le tableau n.° 7 les différens résultats d'expériences.

30. Nous ferons remarquer les deux suivans: la balle du fusil de rempart dit *renforcé*, qui avait environ 100 calibres de longueur d'ame, a une pénétration de 11 centimètres, dans le chêne, à la distance de 160 mètres (*Manuscrits du dépôt des fortifications*); et la balle du fusil de munition à clapet, qui se charge à balles forcées par la culasse, a une pénétration égale, à la distance de 107 mètres. (*Encycl. Art militaire, Supplément*, tom. IV, p. 566.) Le petit boulet en plomb de l'*Amusette du maréchal de Saxe*, bouche à feu d'une demi-livre de balle, qui se chargeait par la culasse, avait une pénétration de 50 centimètres dans le chêne, à la distance de 650 mètres.

§. II. *Pénétration des boulets, obus et bombes.*

31. Nous présentons dans le tableau suivant les résultats de plusieurs expériences sur la pénétration des boulets dans le bois. Dans ces expériences, la vîtesse des boulets a été déterminée, ce qui a permis de calculer les valeurs de h et les unités de pénétration correspondantes. Les expériences sur le bois de chêne sont dues à Robins (*Traités math.* tom. I.^{er}, pag. 273), et celles sur le bois d'orme, à Hutton (ouvrage cité, pag. 281).

BOIS.	DIAMÈTRES des boulets.	VITESSES.	PÉNÉTRATIONS.	UNITÉS de pénétration.	VALEURS de *k*.
	centimètres	mètres.	mètres.	mètres.	
Chêne *très-dur.*	12,8.	366.	0,864.	1,50.	5058.
Idem.....	12,8.	122.	0,089.	1,41.	5408.
Orme *sain et dur.*	7,06.	457.	0,762.	1,54.	4932.
Idem.....	7,06.	323.	0,406.	1,64.	4624.
Idem.....	4,98.	488.	0,508.	1,27.	5975.
Idem.....	4,98.	366.	0,[illegible]1.	1,70.	4481.
Idem.....	4,98.	255.	0,178.	1,63.	4656.

D'après ces expériences, l'unité moyenne de pénétration dans le bois de chêne est $1^{m},46$. Nous avons calculé le tableau n.° 5 en employant $1^{m},50$. L'unité moyenne de pénétration dans le bois d'orme est $1^{m},54$. Toutes les pénétrations dont le tableau ci-dessus contient les valeurs, ont eu lieu *en plein* bois et dans des pièces très-saines. Il importe de faire remarquer cette circonstance, sur laquelle nous reviendrons. Les enfoncemens dans le bois d'orme ont été déterminés en tirant dans la direction des fibres.

Nous passons actuellement à la comparaison *des* résultats du calcul avec quelques résultats d'expériences.

32. On a fait à l'école militaire de Fontainebleau, en 1805, quelques expériences sur la pénétration des boulets de 12, de 8 et de 4, dans le bois *de* chêne; elles ont donné les résultats suivans. (*Cours*

élémentaire de fortification de M. Leclerc, note citée de Bousmard, n.° 21.) .

	BOULETS DE					
	12.		8.		4.	
	mètres.	mètres.	mètres.	mètres.	mètres.	mètres.
Distances.....	120.	300.	120.	300.	120.	300.
Pénétrations suivant l'expérience.	1,13.	0,95.	1,10.	0,83.	0,79.	0,56.
Pénétrations suivant la théorie...	1,11.	0,75.	0,93.	0,60.	0,68.	0,39.
DIFFÉRENCES.	0,02.	0,20.	0,17.	0,23.	0,11.	0,17.

Toutes les différences sont positives; et elles devaient l'être, parce que le massif avait été construit avec de vieux bois de démolition. Les différences qui répondent à la distance de 300 mètres sont plus grandes que celles qui répondent à la distance de 120 mètres. Ce fait semble indiquer que l'unité de pénétration doit être un peu augmentée aux grandes distances.

33. Dans les belles expériences qui furent faites à Cherbourg en 1785, la pénétration du boulet de 24, chassé à 210 toises ou 410 mètres de distance dans un massif en bois de chêne sain et sans défaut, fut de quarante-deux à quarante-trois pouces; moyenne, quarante-deux pouces et demi, ou $1^{m},15$, qu'on peut réduire à $1^{m},10$ en retranchant 5 centimètres pour deux intervalles vides dans l'épaisseur entre les pièces de bois. Elle fut à très peu près la même à chaque coup, quoique les charges fussent

différentes, les unes de huit livres, et les autres de dix livres. On aura :

Pénétration suivant	l'expérience...	$1^{m},10$.
	la théorie.....	0, 90.
	DIFFÉRENCE en plus...	0, 20.

Cette différence est assez considérable. Nous avons eu pendant quelque temps des doutes sur la distance à laquelle on tirait, parce que la plupart des auteurs qui ont parlé des expériences de Cherbourg ont supposé que cette distance n'était que de 120 toises ou 234 mètres; mais M. le colonel Bruley de Saint-Remy, qui a été directeur des fortifications à Cherbourg, s'est assuré qu'elle était effectivement de 210 toises ou 410 mètres.

34. On a remarqué, dans les expériences de Cherbourg, que quelques boulets qui avaient ricoché avant de frapper le massif, s'y étaient néanmoins enfoncés à la profondeur de $0^{m},717$. On sait aussi que les projectiles perdent très-peu de leur force en ricochant sur l'eau.

35. Texier de Norbec, qui a fait beaucoup d'expériences sur l'effet des projectiles contre les bâtimens de guerre, a obtenu les résultats suivans avec la pièce de 36. (*Recherches sur l'artillerie*, tom. II, pag. 361 et 372.)

Charges.....		10 livres.	9 livres.	12 livres.
Distances.....		390 mètr.	780 mètr.	1170 mètr.
Pénétrations suivant	l'expérience...	1,08.	0,79.	0,60.
	la théorie.....	1,16.	0,68.	0,40.
	DIFFÉRENCES....	—0,08.	+0,11.	+0,20.

Les bâtimens étaient vieux et hors de service; aussi les pénétrations obtenues dans ces expériences sont en général plus grandes que celles qui résultent de la théorie suivie dans ce mémoire.

36. Dans les expériences citées de Cherbourg, les boulets rouges s'enfonçaient à la même profondeur que les boulets froids. Le fatal boulet rouge reçu à bord de *la Taja-Piedra*, celle des batteries flottantes employées à l'attaque de Gibraltar, en 1782, qui fut le plus exposée et sur laquelle était le colonel d'Arcon, s'enfonça de $1^{m},14$ dans la muraille de cette batterie; il traversa le revêtement neuf, qui avait un mètre d'épaisseur en bon bois de chêne, et se logea au-dessus de la flottaison, à la profondeur de $0^{m},14$, dans les vieux membres du bâtiment, qui étaient en bois de cèdre bien sec; il y mit le feu après un temps assez long. (*Conseil de guerre privé &c.*, page 242.) Ce boulet avait été tiré de la distance de 450 mètres environ; il était du calibre de 42, anglais, qui équivaudrait au calibre de 37, français, si ce dernier existait; il différait peu par conséquent du boulet de 36, dont l'enfoncement dans le bois de chêne peut, d'après le tableau n.° 5, être de $1^{m},13$ à la distance de 400 mètres, et de 1 mètre à la distance de 500 mètres.

37. Dans les expériences faites à Meudon, en 1798 (*Aide-mémoire d'artillerie*, page 474.), et dans celles faites à Auxonne, en 1819 (*Nouvelle Force maritime et Artillerie*, par M. Paixhans, page 112.), la pénétration dans le chêne, de l'obus ou boulet creux de 24, chassé à la distance de 400 mètres, avec une charge d'un cinquième de son poids, a

été de 38 centimètres. Le tableau n.° 5 porte 30 centimètres; différence en plus dans l'expérience, 8 centimètres.

38. Deux bombes tombèrent sur les batteries flottantes de Gibraltar : l'une perça net un blindage simple, formé d'un seul rang de pièces de bois de 32 centimètres d'écarrissage, qui n'étaient pas jointives, et qui n'étaient couvertes que d'un seul rang de câbles contigus; l'autre s'enfonça de 49 centimètres dans l'épaisseur d'un blindage triple; elle éclata et porta son effet à l'extérieur sans occasionner le moindre désordre au corps du blindage. Ces bombes avaient été lancées à de très-grandes élévations; on ne sait pas quels étaient leurs diamètres.

Les bombes qui tombent sur les petits bâtimens de guerre, les chaloupes canonnières, les brigs, &c., les percent entièrement et les coulent. Elles ne produisent pas cet effet lorsqu'elles tombent sur les vaisseaux de ligne.

§. III. *Faits d'expériences relatifs à l'effet des boulets et des obus.*

39. La pénétration des boulets dans le bois est accompagnée de quelques circonstances particulières très-remarquables.

« Une circonstance singulière (*Rapport sur les* » *expériences de Cherbourg*, par Meunier) que ces » expériences ont donné lieu d'observer, est l'exac» titude avec laquelle les trous faits par le boulet » se refermaient sur-le-champ. On ne voyait sur le » goudron dont le bordage était enduit, qu'une

» empreinte légère de même diamètre que le boulet, » et au centre de laquelle le bois ne paraissait en- » dommagé que sur l'espace de deux à trois pouces. » Aussi ne put-on mesurer d'abord l'enfoncement » des boulets, quoiqu'on eût préparé pour cela une » sonde de fer très-menue. On fut obligé de percer » le bois avec une longue tarière, comme s'il eût » été encore entier. »

« J'ai vu, dit le professeur Moore (Journal de » Nicholson, cité page 82), des vaisseaux de guerre » pris, qui avaient dans leur bordage des trous de » boulets presque entièrement refermés par le seul » effort du bois, tellement qu'une petite cheville de » bois ou un bouchon de liége suffisait pour fermer » le passage à l'eau. »

Ces faits expliquent comment les vaisseaux peuvent essuyer, sans danger de couler, plusieurs bordées de batteries de terre ou de mer; ils démontrent la nécessité d'employer des bouches à feu de gros calibre contre les bâtimens de guerre, et en un mot, de défendre les ports et les rades par des moyens puissans et qui soient particulièrement redoutables pour les constructions en bois. Les trous des boulets de 12, et à plus forte raison, ceux des boulets de moindre calibre, se referment presque entièrement. Cet effet a sur-tout lieu d'une manière complète lorsque le bois est vert.

4°. Les projectiles qui traversent une pièce de bois, la font souvent fendre longitudinalement, et en enlèvent des éclats. Cet effet s'observe particulièrement à bord des vaisseaux de guerre, et paraît atteindre son *maximum* lorsque les projectiles n'ont que la

vîtesse nécessaire pour traverser l'épaisseur du bois, en sorte que toute la quantité de mouvement qu'ils ont reçue réponde, à très-peu près, à la résistance que peut opposer la muraille des vaisseaux, qui est épaisse de 50 à 60 centimètres. De là les recherches ingénieuses de Robins, Texier de Norbec et autres auteurs sur les charges les plus convenables des bouches à feu dans la marine, et d'un autre côté, celles des ingénieurs sur les changemens à faire dans les constructions navales, pour que les voies d'eau soient toujours refermées aisément par la réaction des fibres ligneuses.

41. Les boulets rouges ont la propriété de mettre le feu aux constructions en bois dans lesquelles ils pénètrent, et ils ne la perdent point en ricochant sur l'eau; il faut une immersion de quatre à cinq minutes pour la leur enlever. Cette propriété les rend très-redoutables aux vaisseaux et dans le bombardement des villes. Cependant, comme ils ne produisent pas leur effet instantanément, qu'il se passe toujours un certain temps pendant lequel une fumée se dégage avant que la combustion ait lieu, on parvient à éteindre les boulets rouges et à arrêter les progrès du feu dans le bois par une surveillance active et bien dirigée. L'effet des boulets rouges est sur-tout lent dans les massifs composés de pièces de bois dur, exactement jointives et à grandes dimensions, en un mot dans les massifs où aucun courant d'air ne peut alimenter la combustion.

42. On a constaté, dans les épreuves sur les obus, que ces projectiles mettent le feu dans les massifs en bois où ils éclatent; mais cela n'a lieu

qu'après que les premiers coups ont déchiré le bois et séparé ses fibres. On attend un autre effet, plus prompt et également redoutable, des obus employés contre les bâtimens de guerre; c'est celui qui est dû à la quantité de poudre qu'ils contiennent. Il n'est pas nécessaire qu'ils traversent la muraille des vaisseaux; il suffit qu'ils s'y logent à une profondeur de 30 à 40 centimètres : les bordages extérieurs voisins de l'explosion sont largués, décloués; les bordages intérieurs sont enfoncés (1). De semblables dégâts sont alarmans à bord des navires.

43. *L'angle* sous lequel les boulets commencent à ricocher sur un sol ferme, est de 8 degrés environ. Nous évaluons à 26 degrés l'angle sous lequel ils doivent commencer à ricocher sur le bois. Il est certain, d'après quelques expériences, que cet angle est au-dessous de 50 degrés; car, dans quelques épreuves, la pénétration a eu lieu sous cet angle, même en tirant avec de petites charges.

§. IV. *Autres faits relatifs à la fortification.*

44. Le peu de résistance que les bois opposent soit à la pénétration, soit à la percussion des projectiles, était bien connu de Cormontaingne. « Aucune » des pièces de bois employées dans la fortification, » dit cet ingénieur, n'est à l'épreuve du choc d'un » boulet de 24 tiré à ricochet avec 8 livres de poudre

(1) Dans les expériences faites à Brest, en 1824, avec les obusiers de 8 pouces proposés par M. Paixhans, qui lancent un projectile du poids de 55 livres, lequel peut contenir 4 livres de poudre, les effets de percussion et d'explosion ont été étonnans. A la distance de 590 mètres, l'enfoncement du projectile, chassé par une charge de 8 livres, a été de $0^{m},76$. (*Expér. faites à Brest*, in-8.°, 1825.)

» et même 4 livres seulement, si elle est plantée et » dressée verticalement, et qu'elle soit frappée direc- » tement par le boulet *dans le milieu de son épaisseur.* » Ainsi le ricochet, dans les siéges, détruit à la longue » les palissademens et les poutrelles de 16 à 32 cen- » timètres dont on fait les réduits dans les places » d'armes. Il détruit également les ponts de commu- » nication; car les plus gros bois de cette espèce de » ponts volans ont de 22 à 25 centimètres seulement » d'écarrissage. »

Dans une expérience faite à Metz, en 1740, l'on tira à ricochet 200 obus de 8 pouces, à 140 mètres de distance, dans le prolongement d'une branche de chemins couverts qui avait été mise en état de défense; le palissadement de la place d'armes rentrante et son réduit ou tambour en charpente furent tellement endommagés, que l'on put reconnaître qu'ils n'étaient pas à l'abri d'insulte. La palissade inclinée, plantée en avant du tambour, n'avait pas été aussi endommagée que celle plantée debout; mais on jugea que les obus restés au pied de cette palissade l'auraient mise en grand désordre, s'ils avaient été chargés.

Du Puget rapporte qu'au siége d'Hulst, huit pièces de 24 détruisirent, à la distance de 1170 mètres, les palissades redoublées, les herses, pointes de fer et autres obstacles qui défendaient ce fort.

45. Cormontaingne ajoute qu'on doit même recouvrir de terre les blindages inclinés appuyés à un mur solide et construits avec des bois de 32 à 32 centimètres d'écarrissage, pour qu'ils soient à l'épreuve du choc de la première volée du boulet de

24 tiré à ricochet, à la distance de 300 mètres. Mais il est d'expérience (Bousmard, tome III, page 104), que les blindages formés de corps d'arbres de 27 à 32 centimètres d'écarrissage, dressés jointifs sous un angle d'environ 50 degrés, contre un mur ou un autre appui suffisamment solide, résistent dans cette situation à la chute des bombes. Le mur auquel ils sont appuyés ne doit pas faire face aux attaques, afin qu'ils ne soient pas exposés à recevoir à angle droit (1) le choc des bombes.

Les blindages pour magasins de batteries, que les Anglais avaient reconnus être à l'épreuve de la bombe (*Siéges d'Espagne*, page 411), étaient formés de poutres de 22 à 27 centimètres d'écarrissage, adossées à un épaulement parallèle à la place, sous l'angle de 63°26'. Ces poutres avaient 4 mètres de longueur et étaient recouvertes de deux rangs de sacs à terre placés sur une toile goudronnée. La construction des magasins de batteries de l'artillerie française présente également une grande solidité.

46. Les pièces de bois, essence de pin ou de sapin, qu'on emploie fréquemment en Allemagne dans la construction des ouvrages de campagne,

(1) Il est évident que la différence entre l'effet du boulet de 24 et celui de la bombe tient à cette circonstance; il est probable que, si le blindage n'était incliné que de 15 degrés au-dessus de l'horizon, il résisterait dans cette situation au boulet de 24, et ne résisterait pas aux bombes. Un blindage formé avec des poutrelles de 22 centimètres, inclinées de 15 degrés à l'horizon, est à l'épreuve du boulet de 12 à la distance de 225 mètres. (Expériences faites à Berlin en 1803, *Bull. des sciences mil.*, numéro de septembre 1824, page 414.) Le boulet ricochait sur les poutrelles, en y creusant des ovales de 5 centimètres au plus de profondeur.

ne sont pas à l'épreuve, à la distance de 600 mètres, des boulets de 12, même de ceux de 8. Toutes les parties en bois de ces ouvrages doivent donc être soigneusement dérobées aux vues des hauteurs d'où elles pourraient être battues de plein fouet. Tel est l'objet, dans la construction des *blokhaus*, du remblai que l'on fait jusqu'à la hauteur des créneaux et de la saillie extérieure des blindes. Les constructions en bois présentent d'ailleurs des solutions de continuité où les projectiles ne trouvent presque aucune résistance.

Les caponnières, destinées à la défense des fossés des ouvrages, ne sont pas exposées aux coups de plein fouet; si les pièces de bois employées dans leur construction ont 32 centimètres de grosseur, il est positif (Saint-Paul, *Traité de fortification*, t. II, pages 88 et 174) qu'elles ne peuvent être détruites que par le canon amené sur la contrescarpe. Mais les palissades de petit échantillon sont brisées par le boulet du plus petit calibre, tiré même à ricochet.

Suivant le même auteur (ouvrage cité, page 132), il faut du canon de 12 pour détruire les abattis faits avec des corps d'arbres, tandis que le canon du plus petit calibre finit par briser et disperser les abattis faits avec des branches d'arbres.

Cependant une palanque composée de grosses palissades peut remplacer quelquefois avec succès une enceinte en terres. On en a eu l'exemple dans la défense de Dresde en 1813; les boulets de l'ennemi n'avaient fait que meurtrir les palissades des palanques en passant entre deux (*Considérations sur l'art de la guerre*, page 299). On a vu (n.° 44) qu'ils

doivent frapper dans le milieu de leur épaisseur les bois de fort échantillon pour les briser.

Les portes de guerre, dont l'épaisseur excède rarement 20 centimètres, ne sont pas à l'épreuve du boulet de 12 à la distance de 800 mètres.

On fit en 1809, au camp de Spitz, sur la rive gauche du Danube, une espèce de simulacre d'attaque, pour reconnaître jusqu'à quel point les *blokhaus* peuvent résister à l'artillerie. On employa à cet exercice toutes les batteries de campagne du camp; elles lancèrent environ 2000 projectiles, tant boulets qu'obus, contre une redoute dans laquelle était un *blokhaus* construit avec soin. Elles se rapprochaient davantage de la redoute après chaque décharge. Plusieurs boulets traversèrent le parapet de l'une des faces, qui n'avait que deux mètres d'épaisseur, et allèrent battre de plein fouet contre le *blokhaus*. Cet ouvrage avait résisté aux projectiles, mais il était très-maltraité : un ou deux obus y avaient pénétré; toutes les palissades de son fossé avaient été coupées par les boulets; elles dépassaient d'un mètre le terre-plein de la redoute (*Man. du dépôt des fortifications*, dessin de M. Breistroff).

47. Il résulte de tout ce qui précède, qu'il faudrait donner aux bois des épaisseurs énormes pour qu'ils fussent à l'épreuve des boulets. Le moyen le plus sûr pour les mettre à l'épreuve, est de les recouvrir de bandes de fer très-rapprochées les unes des autres. M. le colonel du génie Marion a fait l'expérience de ce moyen à Venise, en 1809 : les estacades en pièces de bois flottantes qu'on employait pour fermer les canaux des lagunes, étaient fré-

quemment coupées par les boulets de l'ennemi. On les recouvrit de bandes de fer ; elles résistèrent parfaitement.

Lors même que l'on donnerait aux bois l'épaisseur de $1^{m},60$, qui est regardée comme équivalente, dans les constructions en bois, à celle de 6 mètres pour les parapets en terre, ils ne seraient à l'épreuve ni des obus ni des boulets rouges. D'après une expérience faite aux États-Unis, l'épaisseur des barres de fer propres à mettre les constructions ordinaires en bois à l'épreuve de toute espèce de projectiles, devrait être de 12 centimètres ; on pourrait laisser des mailles de 8 centimètres carrés. (*Notice* de M. de Montgéry, capitaine de frégate.)

CHAPITRE IV.

EFFET ET PÉNÉTRATION DES PROJECTILES DANS LES MAÇONNERIES.

§. I.er *Pénétration des boulets.*

48. On a fait peu d'expériences sur l'effet et la pénétration des boulets dans la maçonnerie. Les seules peut-être qu'on puisse citer, sont celles que l'on fit à Toulon en 1763, avec une pièce de 24, de laquelle on tira six coups, à la distance de 23 mètres, contre un ancien revêtement construit en 1593. Ce revêtement avait 8 mètres de hauteur, 1 mètre d'épaisseur au cordon, un talus extérieur de $\frac{1}{3}$, et un contre-talus intérieur par lequel il s'appuyait aux terres. Son parement, en moellons vifs, avait 32 centimètres d'épaisseur réduite ; la partie intérieure avait été bâtie avec du safre, matière composée de gravier, rocailles et petits cailloux si bien

mastiqués avec une espèce d'argile qui durcit extrêmement, que le safre, cassé à coups de masses et de pics à roc, produit des blocs irréguliers extrêmement durs. On abaissait la volée de la pièce pour tirer perpendiculairement au revêtement. La charge fut d'abord de 10 livres, puis de 8 livres.

La pénétration du premier boulet fut de $0^{m},704$; celle du deuxième, de $0^{m},50$; celle du troisième, de $0^{m},80$; celle du quatrième, de $0^{m},50$; celle du cinquième, de $0^{m},73$; *pénétration moyenne*, $0^{m},65$; *maximum*, 0,80; *minimum*, 0,50. Le sixième coup que l'on tira eut pour objet une autre expérience de laquelle il va être parlé.

Les trous des boulets avaient la forme de cônes tronqués, jusqu'à une profondeur de 50 centimètres environ, comptés à partir du parement; au-delà, sur une profondeur de 22, 25 à 32 centimètres, ils avaient la forme de cylindres d'un diamètre égal à celui des boulets; l'ouverture des trous, dans le parement du revêtement, avait de 50 à 65 centimètres de diamètre à peuprès. Les parties intermédiaires entre les trous, distans de 1 mètre à $1^{m},20$ de milieu en milieu, n'avaient pas été ébranlées.

Dans l'expérience relative au sixième coup, on fit un épaulement de $2^{m},30$ d'épaisseur avec des sacs à terre que l'on avait remplis de safre en petites parcelles, mais non pas exactement, afin de pouvoir les serrer le plus possible les uns contre les autres; on les arrosait et on les battait en les posant. Le boulet de 24, chassé avec une charge de 12 livres de poudre dans cet épaulement, à la même distance de 23 mètres, s'y enfonça de $1^{m},80$: on peut

conclure de cette expérience, avec assez de vraisemblance, que, dans les premières expériences, le boulet employait à-peu près les trois cinquièmes de sa vîtesse pour rompre le parement en moellons vifs. C'est la vîtesse qui lui reste encore à la distance de 600 mètres.

49. Suivant Cormontaingne, la pénétration du boulet de 24 dans les maçonneries de moellons, qui répond à la charge de 16 livres, est de 96 centimètres, à la distance de 40 mètres, et de 8 centimètres seulement à la distance de 1140 mètres; à partir de 40 mètres, elle diminue de 8 centimètres à mesure que la distance augmente de 100 mètres; ainsi elle serait de 88 centimètres à 140 mètres, de 80 centimètres à 240 mètres, ainsi de suite. Les deux termes extrêmes de cette série de pénétrations sont les seuls qui paraissent avoir été déterminés par expérience. On doit pointer la pièce à 8 degrés au-dessus de l'horizon en tirant à 1140 mètres de distance. Nous ferons remarquer que Cormontaingne supposait toujours la charge de 16 livres de poudre. On n'obtiendrait, à la distance de 40 mètres, qu'une pénétration de 75 à 80 centimètres, comme dans les expériences de Toulon, en employant des charges de 8 à 10 livres.

Pour calculer le tableau n.° 8 des pénétrations dans la maçonnerie, nous avons fixé l'unité de pénétration dans la maçonnerie de briques à 1 mètre, et les unités de pénétration dans la maçonnerie de moellons où il y a un parement à détruire, à 90 centimètres pour le boulet de 36, 70 centimètres pour celui de 24, et 50 centimètres pour celui de 12.

C'est à l'expérience à confirmer cette règle, sur laquelle nous n'insistons pas.

50. M. le baron C...., maréchal-de-camp, rapporte (1) « qu'on put se convaincre, au siége mémorable de Gaëte, en 1806, en battant en brèche à plus de 150 toises de distance, que les effets produits par les pièces de 36 étaient au moins doubles de ceux des pièces de 24; que ce fut sur-tout dans le tir des *boulets creux* (merveilleusement facilité par l'emploi du sabot conique modifié), que les premières eurent sur les secondes des avantages décisifs, en achevant promptement les brèches, après que le revêtement en pierres se trouvait sapé, et en les déblayant ensuite de manière à les rendre praticables. » On sait aussi que, quoique les obus se brisent contre les murs en pierres de taille, ils y font néanmoins brèche.

§. II. *De l'effet des boulets contre les maçonneries.*

51. Si l'on compare les pénétrations dans la maçonnerie de deux boulets lancés, l'un avec la charge de moitié de son poids, l'autre avec la charge du tiers de son poids, on voit (tableau n.° 8) que le rapport entre les pénétrations approche d'autant plus de l'unité que la distance est plus grande. Il devient donc inutile d'augmenter la charge pour battre en brèche aux grandes distances.

Il est d'expérience qu'on peut encore faire brèche de la distance de 600 mètres, et même de plus loin,

(1) *Précis des épreuves comparatives faites à la Fère en 1820 et 1821, &c.*, section E, page 15.

suivant la qualité de la maçonnerie ; mais il faut que les batteries soient fortes et bien servies. La brèche exige aussi plus de temps, plus de projectiles. On trouve, en comparant l'étendue des brèches avec la consommation des munitions, dans plusieurs siéges d'Espagne, que les brèches de 20 mètres de largeur, ouvertes à la distance de 500 mètres, ont exigé cinq mille cinq cents boulets de gros calibre. Les mêmes brèches, faites de la distance de 40 mètres, exigeraient mille cinq cents boulets.

Les revêtemens en décharge peuvent également être battus en brèche à une grande distance. Ceux de Dillenbourg, dans la guerre de sept ans, année 1760 (*Conseil de guerre privé sur Gibraltar, &c.* pag. 371), furent battus en brèche à 624 mètres de distance (1). Cette circonstance a pu contribuer, autant que la forme de ces revêtemens, à augmenter la difficulté d'y faire brèche, difficulté qui fut bien remarquée.

Quant aux revêtemens détachés des terres, on ne peut point douter qu'ils ne fussent sapés et ruinés en moins de temps que les revêtemens adossés aux terres, et que la différence ne fût de deux à trois jours sur le temps nécessaire pour faire une grande brèche. On a remarqué, dans quelques expériences, qu'il se détache des pierres du derrière de ces murs avant qu'ils soient percés par le boulet.

52. Les auteurs des *Mémoires sur la fortification perpendiculaire* (page 71) supposent, dans l'attaque d'un nouveau système, qu'un mur de $1^{m},30$ d'épaisseur, qui est vu, sera ruiné par le boulet de 24 à

(1) Les *Mém. sur la fortification perp.* portent 390 mètres (pag. 73).

730 mètres de distance, et que toutes les murailles crénelées, élevées dans l'intérieur des ouvrages pour y servir de réduits, peuvent également être ruinées par le boulet de 24 tiré à ricochet. On sait que ces murailles ont 50 à 80 centimètres d'épaisseur.

Au reste, de semblables murailles, eussent-elles 2 mètres d'épaisseur, ne paraissent pas capables de résister long-temps aux plongées de projectiles de gros calibre, d'après les expériences qui ont été faites à Woolwich, en Angleterre, dans le mois d'août 1823. Dans ces expériences, on a soumis à une épreuve qui paraît décisive, les revêtemens détachés des terres et masqués par un couvre-face, qui sont proposés dans plusieurs systèmes de fortification. On avait construit long-temps à l'avance un revêtement de ce genre, son couvre-face et le rempart en arrière; le parapet du couvre-face avait 8 mètres d'épaisseur, et $3^{m},40$ de commandement sur la campagne; son talus extérieur était à 45 degrés; son talus intérieur était plus doux, en sorte que la largeur du couvre-face, mesurée sur le terrain, était de $25^{m},60$. Le mur avait même hauteur que le couvre-face, $2^{m},13$ d'épaisseur à la base, et $1^{m},83$ d'épaisseur au sommet; il était distant de $8^{m},20$ seulement du pied du talus intérieur du couvre-face; sa longueur était de $9^{m},30$; celle du couvre-face, mesurée à la crête, était de $15^{m},60$. Le mur était percé d'un créneau. On avait fait deux batteries, l'une à 450 mètres de distance, et l'autre à 500 mètres; la première était armée de six obusiers de 8 et 10 pouces, et la seconde de six caronades du calibre de 68. On employa trois jours à cette expérience; mais la durée totale du feu ne

fut que de sept heures et demie; chaque bouche à feu tira deux cents coups. Le mur fut entièrement démoli depuis le sommet jusqu'à un mètre environ au-dessus du sol. Le parapet du couvre-face avait été peu écrêté par les projectiles, soit qu'ils eussent été lancés trop haut ou trop bas : on pointait sous l'angle de 15 degrés. La maçonnerie paraissait sèche (1).

Les revêtemens ordinaires, adossés aux terres, ne résisteraient peut-être même pas aux coups plongeans des gros projectiles (2).

53. Il nous reste à parler de la limite de l'angle d'incidence sous lequel les revêtemens peuvent être battus en brèche. Suivant Cormontaingne (*Mémorial pour l'attaque*, page 264), on ne peut plus battre en brèche, si l'angle d'incidence est moindre de 45 degrés; et il faut même, s'il est possible, dans ce cas, faire croiser sur la brèche une autre batterie, afin que ce que l'une ébranle, l'autre le puisse renverser. Nous évaluons à 37 degrés l'angle sous lequel le ricochet commence à avoir lieu contre les revêtemens.

§. III. *Des Bombes.*

54. L'effet dû au choc des bombes sur les voûtes, considéré comme instantané, est en raison du poids des bombes, de leurs vîtesses finales, et des *sinus*

(1) Rapport de M. le capitaine d'artillerie Robert.

(2) On lit, dans la *Relation du siége de la citadelle d'Alexandrie en 1799* (*Histoire des guerres de la révolution*, tome XII, page 52), que les batteries de l'assiégeant établies au pied des glacis et en arrière firent brèche, au moyen d'un tir particulier à petites charges, à la face d'un bastion qu'elles ne découvraient pas, et que cette circonstance, ignorée de l'assiégeant, hâta la reddition de la place.

des angles d'incidence rapportés au plan du couvert qui reçoit le choc. Lorsque l'angle d'incidence est droit, et que la vîtesse finale de la bombe atteint le limite dont elle est susceptible, la force de percussion est la plus grande possible. Les voûtes extradossées de niveau sont exposées à être battues avec la plus forte percussion. Les auteurs des *Mémoires sur la fortification perpendiculaire* (page 158) prescrivent de donner 2 mètres ou $1^{m},60$ au moins d'épaisseur au chargement en terre des souterrains dont les voûtes n'ont qu'un mètre d'épaisseur et sont extradossées de niveau.

55. Les voûtes extradossées en chape composée de deux pans, qui ordinairement sont également inclinés au-dessus de l'horizon, ne sont pas exposées à être battues avec la plus forte percussion. On sait par expérience que les voûtes des magasins à poudre qui ont été construites de cette manière, d'après les devis de Vauban, se sont soutenues jusqu'à présent sans qu'il leur soit arrivé aucun accident, même dans les places assiégées qui ont le plus souffert des bombes (Belidor, *Science des ingénieurs*, liv. IV, chap. IX). « Je ne suis pas d'avis cependant, dit » Vauban (*Défense*, page 179), qu'on s'y fie trop. » C'est pourquoi l'usage, à l'approche d'un siége, est de charger de terres, sur une épaisseur de 1^{m} à $1^{m},30$, l'extrados des voûtes de ces magasins.

On a adopté généralement, même à l'étranger, les magasins à poudre de Vauban. M. Durivau, lieutenant du génie, a bien voulu, à notre sollicitation, lever le magasin à poudre de la citadelle de Pampelune, sur la voûte duquel étaient tombés

différens projectiles, boulets, bombes et obus, pendant le siége de 1823. Ce magasin était semblable aux magasins à poudre de Vauban, à cette différence près, que l'extrados de la voûte était recouvert par une maçonnerie extrêmement dure, qui tenait lieu du chargement ordinaire en terres; il y entrait des briques, des pierres de toute grosseur et beaucoup de mortier; la pioche l'entamait très-difficilement: elle avait $1^{m},40$ d'épaisseur au-dessus de la clef de la voûte, et 1 mètre d'épaisseur au-dessus des reins; l'angle formé par les pans de la chape était de 38 degrés. Les bombes même n'avaient produit d'autre effet que de briser les tuiles de la couverture, et de laisser une empreinte de 10 à 14 centimètres de profondeur sur la chape à l'endroit de leur chute.

CHAPITRE V.

PÉNÉTRATION DANS LES FASCINES, DANS LA LAINE ET AUTRES MATIÈRES, ET EFFETS MEURTRIERS DES PROJECTILES.

§. I.er *Des Fascines, Fagots de sape, &c.*

56. A la distance de 15 mètres, la pénétration de la balle du fusil de munition dans un massif de fascines bien piquetées, et faisant une épaisseur d'un mètre, est de 8 à 9 centimètres au plus : elle paraît dépendre uniquement du chemin tenu par la balle. (Expériences de M. Villeneuve.)

A la distance de 22 mètres, la pénétration de la balle du fusil de munition dans un parapet formé de fagots de sape en bois de charmille sec, placés

debout sur deux rangs *jointifs*, chacun de $0^{m},22$, est de 33 centimètres ; la *pénétration* de la balle du fusil de rempart est de 44 centimètres. (Expériences faites au 3.^e régiment du génie.)

A la distance de 22 mètres, la pénétration de la balle du fusil de munition dans un gabion rempli de fagots de sape est de 50 centimètres, et celle de la balle du fusil de rempart, de 60 centimètres. (Mêmes expériences.) Quelques balles traversèrent dans les endroits où les fagots ne joignaient pas (1).

Ainsi un parapet de fagots de sape bien serrés, placés dans un gabion de sape, ou maintenus debout sur deux rangs d'épaisseur, est à l'épreuve des balles de tous les calibres actuels. Mais toutes les masses couvrantes qui sont formées de fascines ou de fagots de sape, résistent bien moins à la fin du feu qu'au commencement, parce qu'après quelques coups, les branches étant, les unes brisées, les autres écartées, elles n'opposent plus qu'un léger obstacle. On peut fixer ses idées, d'après cette observation, sur le cas qu'on doit faire des ouvrages de campagne construits entièrement en fascines.

Le gabion roulant, farci en fascines ; est à l'épreuve des balles de fusil de rempart, à 22 mètres de distance, à 15 mètres même. Mais ce gabion est d'un poids énorme, et très-difficile à mouvoir : vide, il pèse 110 kilogrammes ; plein, il pèse 484 kilogrammes.

(1) La pénétration dans les fascines, les fagots de sape et les gabions farcis, est d'autant moindre, que l'arrangement des bois intérieurs est mieux fait. Il est donc important de placer les bois avec beaucoup de soin, dans la confection de ces matériaux.

§. II. *De la Laine.*

57. On se sert, dans les siéges et dans d'autres occasions en campagne, de matelats et de sacs de laine, pour former promptement un masque à l'épreuve de la balle. On en fait aussi l'épaulement des batteries là où il n'y a pas de terre. « Ces » sacs (*Mémorial pour l'attaque*, note, page 62), » doivent avoir, dans ce cas, $5^{m},50$ de longueur sur » $2^{m},30$ d'épaisseur et autant de hauteur. On les » met sur trois rangs, l'un devant l'autre, et sur deux » de hauteur; ce qui fait $6^{m},90$ d'épaisseur et $4^{m},60$ » de hauteur. On les lie et on les serre avec des cor- » dages arrêtés à des piquets, de manière à réduire » la hauteur totale à $2^{m},30$ ou $2^{m},60$, et l'épaisseur » à 5 ou 6 mètres. » On verra, par les expériences suivantes, combien il est nécessaire de serrer fortement la laine, afin qu'elle oppose le plus de résistance qu'il est possible à la pénétration des projectiles.

On fit des expériences au Havre, en 1779, pour éprouver différens bastingages: la balle du fusil de munition, chassée à la distance de 40 mètres, traversait quatorze matelas et une planche de chêne contre laquelle ils étaient appuyés. Ces quatorze matelas faisaient une épaisseur de $1^{m},12$ environ. Deux grands sacs remplis, l'un de laine, l'autre de bourre, qu'on plaçait devant les matelats, n'amortissaient pas la balle. Nous dirons, à cette occasion, que la bourre oppose beaucoup moins de résistance que la laine.

58. Dans les expériences du 3.e régiment du

génie, le gabion de $1^{m},30$ de diamètre, farci avec des sacs de laine bien pressés, était à l'épreuve de la balle du fusil de munition, à la distance de 22 mètres ; mais il était traversé par la balle du fusil de rempart, à 70 mètres de distance. Le même gabion, quand la laine était contenue dans un matelas très-serré et bien piqué, était à l'épreuve des coups du fusil de rempart, à la distance de 10 mètres. Il pesait 365 kilogrammes.

On roulait le matelas pour le mettre dans le gabion. Il avait 13 mètres de longueur, 80 centimètres de largeur et 8 centimètres d'épaisseur ; il était piqué par carreaux de 8 centimètres de côté. On s'en servit pour faire l'expérience suivante : on le plia en dix, et, dans cet état, on le serra fortement, par le moyen d'une corde, entre deux claies qu'il débordait. A la distance de 22 mètres, la balle du fusil de rempart traversait neuf plis et s'enfonçait ainsi de 72 centimètres ; à la distance de 40 mètres, elle traversait huit plis ou s'enfonçait de 64 centimètres. Lorsqu'elle frappait au-dessus des claies, elle traversait un pli de plus.

Ces pénétrations sont à peu près doubles de celles qui ont été obtenues dans les terres de parapet rassises. Il n'est donc pas exact de dire, avec quelques auteurs, qu'un pied de laine peut soutenir un coup de mousquet, ce qu'un pied de terre bien battue peut faire. Suivant Deville, les coups de mousquet percent les plus grosses balles de laine. Ainsi les légers sacs à terre dont Landsberg, ingénieur hollandais, qui avait fait beaucoup de siéges, s'est servi

quelquefois pour faire des logemens à la sape volante, ne sont pas à l'épreuve des balles.

59. A la distance de 75 mètres, une épaisseur de 1^{m},14 en bonne laine n'est pas traversée par les balles de 2 onces tirées à cartouches dans un canon de 6 chargé au tiers du poids des balles; aux distances de 75, 150 et 225 mètres, le boulet de 6, chassé par une charge du tiers de son poids, traverse un gabion farci de 1^{m},14 de diamètre et une planche à laquelle il est appuyé. (Expériences faites par les étrangers à Mézières, en 1815.)

§. III. *Des Bastingages.*

60. Les bastingages des navires présentent comme un long encaissement de 32 centimètres de largeur, qu'on remplit avec les hamacs, les hardes de l'équipage, des matelas, des couvertures, &c. On peut encore remplir cet encaissement avec toute espèce d'étoffe, avec du foin, de la laine, de petits cordages, &c.

On s'est assuré par des expériences faites à Brest, en 1786, que tous les bastingages faits de cette manière ne sont pas à l'épreuve de la simple mousqueterie, à 100 mètres de distance. Les matières qui résistent le plus sont les cercles en bois pour futailles ou feuillards, le fort cordage et la tôle.

La tôle est préférable, parce qu'elle n'a besoin que d'avoir 2 $\frac{1}{2}$ millimètres d'épaisseur; cependant la feuille de tôle simple cède au coup de fusil tiré de 50 mètres: mais en la couvrant d'une planche ayant seulement 18 à 20 millimètres d'épaisseur, elle résiste parfaitement. Alors elle offre le bastingage le

plus sûr, le plus léger et le moins volumineux. On doit placer la tôle en dehors pour amortir le coup. (*Tableau de l'architecture navale*, par M. Ch. Dupin, ouvrage inédit.) (1)

§. IV. *Des Armes défensives.*

61. La cuirasse actuelle des cuirassiers, en tôle brute de 28 décimillimètres, n'est pas à l'épreuve du coup de fusil à la distance de 150 mètres, ni à l'épreuve du coup de pistolet à la distance de 35 mètres. (*Aide-mémoire d'artillerie*, page 639.) On est sur la voie d'une amélioration importante. (*Mémorial de l'artillerie*, n.° 1, page 46.)

Des cuirasses semblables, en acier d'Allemagne corroyé, seraient à l'épreuve du coup de fusil à la distance de 100 mètres. Elles coûteraient 12 fr. de plus. (*Aide-mémoire d'artillerie.*)

« La cuirasse de sapeur, épaisse de 5 millimètres, » est à l'épreuve des balles de fusil et de carabine » courte, à la distance de 24 mètres ; mais à la même » distance elle n'est pas à l'épreuve de la carabine » tyrolienne, et la carabine longue française lui fait » une empreinte profonde. » (*Aide-mémoire d'artillerie.*) Il est probable qu'à la même distance elle ne serait pas à l'épreuve de la balle de fusil de rempart.

Vauban (*Défense des places*, page 217) propose,

(1) Deville rapporte que les mantelets formés de planches épaisses de trois doigts, et couvertes de lames de fer ou de grosses cordes clouées bien près les unes des autres, sont à l'épreuve des coups de mousquet à cinquante pas ; et que la balle de mousquet, à cette distance, perce jusqu'à dix-sept mains de papier.

de donner aux défenseurs, dans les siéges où l'on tire beaucoup de pierres et de grenades, des bonnets d'osier faits en forme de hottes, matelassés au dedans et remplis de foin dans le fond. On a constaté récemment, à Vienne en Autriche, que ces bonnets amortiraient effectivement les coups de tous les petits projectiles verticaux, qu'on a coutume de lancer avec les mortiers.

§. V. *Effet meurtrier des projectiles.*

62. On a fait, en 1795, dans l'artillerie danoise (*Artillerie* de Scharnhorst, 3.^e volume, 62.^e tableau), quelques expériences pour constater sur le cheval l'effet meurtrier de petites balles en fer, pesant, les unes le quart d'une once, les autres une demi-once : ainsi elles étaient inférieures en poids aux balles actuelles de dix-neuf à la livre ; mais celles de demi-once en fer avaient même diamètre que ces dernières. Le résultat de ces expériences fut de faire adopter pour les cartouches à canon des balles de plus d'une demi-once ; aujourd'hui les balles de canon de 3 pèsent une demi-once. On fit ces expériences avec un fusil ordinaire ; on tirait à la distance de 5 mètres, contre un cheval vivant, et contre un mannequin rempli de foin, figurant un cavalier de grandeur naturelle, vêtu d'une chemise, d'un habit et d'une veste d'ordonnance, avec bottes, chapeau, et deux bandoulières en cuir qui se croisaient sur la poitrine. On a rapporté l'effet meurtrier des balles chassées par différentes charges à leur pénétration dans une planche contre laquelle on les tirait avec les mêmes charges. Voici les résultats :

Les balles d'un quart d'once (diamètre, 1 $\frac{1}{4}$ centimètre), qui ne s'enfoncent dans une planche de sapin que de la moitié de leur diamètre, sont absolument sans effet. Elles ne sont pas encore capables d'un effet meurtrier, lorsqu'elles s'enfoncent de tout leur diamètre.

63. Ces balles commencent à être capables d'un effet meurtrier, lorsqu'elles traversent une planche de sapin de 2 centimètres. Néanmoins elles ne peuvent pas encore briser les os, et mettre, dans tous les cas, les hommes et les chevaux hors de combat. Mais elles traversaient la bandoulière, l'habit et la veste du mannequin, et pénétraient dans le foin. Lorsque ces petites balles traversent franchement une planche de sapin de 3 centimètres, elles sont aussi efficaces pour tuer que toute autre balle de *fusil*.

64. Les balles de demi-once, *en fer*, qui ne s'enfoncent que de la moitié de leur diamètre (8 millimètres) dans une planche de sapin, sont de peu d'effet; elles rebondissent sur la peau du cheval. Celles qui s'enfoncent de tout leur diamètre (16 millimètres) commencent à être meurtrières; mais elles ne peuvent pas, dans tous les cas, mettre les hommes et les chevaux hors de combat.

La distance à laquelle la balle du fusil de munition peut s'enfoncer de 16 millimètres dans le bois de sapin, est de 300 mètres, ainsi c'est à partir de cette distance qu'on doit compter sur son effet meurtrier. Les mêmes balles de demi-once en fer sont très-meurtrières lorsqu'elles percent une planche de sapin de 3 centimètres, effet qui répond

à une distance de 240 mètres pour la balle de munition. Mais il est constant (1) que les carabines et les fusils de rempart renforcés portent la balle à 400 mètres, et même à 500 mètres, avec toute la force nécessaire pour tuer un homme. A mesure que le calibre de la balle augmente, l'enfoncement auquel son effet meurtrier doit être assimilé est moindre. On ne saurait croire, dit Robins, combien il faut peu de poudre pour rendre le coup d'un boulet mortel à tous ceux qu'il rencontre. Le roulis même du boulet, suivant Cormontaingne, est extrêmement dangereux à une grande distance.

(1) Leblond, *Artillerie raisonnée*, page 248. Deville, *Fortifications*, page 46.

N.° I. *Tableau des valeurs approchées des vîtesses finales des projectiles.*

OJECTILES.	CHARGES.	VÎTESSES initiales.	VÎTESSES FINALES AUX DISTANCES DE 50m.	100m.	200m.	300m.	400m.	500m.	600m.	800m.	1000m.
ALLES											
19 à la livre.	1/2.	500.	389.	308.	202.	143.	111.	78.	55.		
14 *idem*...	1/2.	525.	419.	338.	228.	163.	125.	92.	68.		
8 *idem*...	1/2.	525.	435.	363.	258.	191.	148.	120.	93.		
OULETS											
8.....	1/3.	500.	483.	467.	436.	407.	381.	357.	335.	295.	262.
6.....	1/3.	500.	481.	463.	430.	400.	372.	346.	323.	282.	247.
4.....	1/2.	546.	523.	500.	459.	422.	388.	358.	330.	283.	244.
4.....	1/3.	500.	479.	459.	422.	388.	357.	330.	305.	262.	227.
4.....	1/8.	300.	287.	278.	257.	240.	224.	209.	196.	174.	154.
6.....	1/3.	500.	476.	453.	411.	374.	341.	311.	285.	241.	206.
2.....	1/3.	500.	474.	449.	404.	364.	329.	299.	271.	227.	192.
8.....	1/3.	500.	470.	442.	392.	348.	311.	288.	250.	209.	171.
6.....	1/3.	500.	467.	437.	382.	337.	297.	264.	235.	190.	157.
4.....	1/3.	500.	462.	428.	367.	317.	276.	241.	212.	169.	138.
3.....	1/3.	460.	422.	388.	329.	281.	242.	211.	185.	146.	121.
OBUS											
8 pouces..	1/7.	400.	384.	367.	338.	312.	289.	268.	249.	217.	190.
8 *idem*....	1/26.	200.	194.	188.	176.	166.	157.	149.	141.	128.	118.
6 *id.* nouv.	1/7.	400.	378.	359.	325.	295.	268.	244.	224.	192.	168.
6 *id.* anc..	1/14.	240.	230.	220.	202.	187.	173.	161.	150.	133.	119.
4 nouv...	1/7.	400.	376.	352.	313.	280.	250.	225.	204.	169.	144.
2 *id*.....	1/16.										

BOMBES.	DENSITÉS.	LIMITES DES VÎTESSES FINALES DES BOMBES de 8 pouces.	de 10 pouces.	de 12 pouces.	de 15 pouces.
inaires.....	4m,80.	140m.	155m.	168m.	188m.
hargées.....	7, 20.	160.	177.	193.	216.

N.° 2. *Tableau des rapports des pénétrations.*

PROJECTILES.	CHARGES.	VITESSES initiales.	RAPPORT DES PÉNÉTRATIONS AUX DISTANCES DE 50m.	100m.	200m.	300m.	400m.	500m.	600m.	800m.	1000m.
BALLES											
de 19 à la livre.	1/2.	500.	1.	0,63.	0,27.	0,14.	0,08.	0,04.	0,02,		
de 14 *idem*....	1/2.	525.	1,31.	0,8 .	0,39.	0,20.	0,12.	0,06.	0,03.		
de 8 *idem*...	1/2.	525.	1,70.	1,18.	0,60.	0,33.	0,20.	0,13.	0,08.		
BOULETS											
de 48.....	1/3.	500.	1,38.	1,29.	1,13.	0,98.	0,86.	0,76.	0,64.	0,52.	0,41.
de 36.....	1/3	500.	1,25.	1,16.	1.	0,86.	0,75.	0,66.	0,56.	0,43.	0,33.
de 24.....	1/2.	546.	1,30.	1,19.	1.	0,84.	0,72.	0,61.	0,52.	0,38.	0,28.
de 24.....	1/3.	500.	1,09.	1.	0,84.	0,72.	0,61.	0,52.	0,44.	0,33.	0,25.
de 24.....	1/8.	300.	0,40.	0,37.	0,31.	0,27.	0,24.	0,21.	0,18.	0,14.	0,11.
de 16.....	1/3.	500.	0,94.	0,85.	0,70.	0,58.	0,48.	0,40.	0,34.	0,28.	0,19.
de 12.....	1/3.	500.	0,85.	0,76.	0,62.	0,50.	0,41.	0,34.	0,28.	0,19.	0,14.
de 8.....	1/3.	500.	0,73.	0,65.	0,51.	0,40	0,32.	0,28.	0,21.	0,14.	0,10
de 6.....	1/3.	500.	0,65.	0,57.	0,44	0,34.	0,26.	0,21.	0,17.	0,11.	0,07.
de 4.....	1/3.	500.	0,55.	0,47.	0,35.	0,26.	0,20.	0,15.	0,12.	0,07.	0,05.
de 3.....	1/3.	460.	0,42.	0,35.	0,25.	0,19.	0,14.	0,10.	0,08.	0,05.	0,03.
OBUS											
de 8 pouces..	1/7.	400.	0,70.	0,64.	0,54.	0,46.	0,40.	0,34.	0,30.	0,22.	0,17.
de 8 *id.*....	1/16.	200.	0,18.	0,17.	0,15.	0,13.	0,12.	0,11.	0,09.	0,08.	0,07.
de 6 *id.* nouv.	1/7.	400.	0,54.	0,49.	0,40.	0,33.	0,27.	0,23.	0,19.	0,14.	0,11.
de 6 *id.* anc..	1/14.	240.	0,20.	0,18.	0,16.	0,13.	0,11.	0,10	0,09.	0,07.	0,05.
de 24 *id.* nouv.	1/7.	400.	0,45.	0,40.	0,31.	0,25.	0,20.	0,16.	0,13.	0,09.	0,07.
de 12 *id.*....	1/16.										

BOMBES.	DENSITÉS.	RAPPORTS DES PÉNÉTRATIONS DES BOMBES de 8 pouces.	de 10 pouces.	de 12 pouces.	de 15 pouces.
Ordinaires.....	4m,80.	0m,09.	0m,14.	0m,19.	0m,30.
Surchargées.....	7, 20.	0, 26.	0, 32.	0, 43.	0, 68.

N.° 3. *Tableau des pénétrations des projectiles dans les terres de parapet ancien.*

PROJECTILES.	CHARGES.	VITESSES initiales.	PÉNÉTRATIONS AUX DISTANCES DE 50m.	100m.	200m.	300m.	400m.	500m.	600m.	800m.	1000m.
BALLES											
de 19 à la livre.	1/2.	500	0,27.	0,20.	0,12.	0,06.	0,04.	0,02.	0,01.		
de 24 *idem*. . .	1/2.	525.	0,35.	0,27.	0,18.	0,09.	0,06.	0,03.	0,01½.		
de 8 *idem*. . .	1/2.	525.	0,45.	0,38.	0,28.	0,15.	0,09.	0,06.	0,04.		
BOULETS											
de 48.	1/3.	500.	5,52.	5,16.	4,52.	3,92.	3,44.	3,04.	2,56.	2,08.	1,64.
de 36.	1/3.	500.	5.	4,64.	4.	3,44.	3.	2,64.	2,24.	1,72.	1,32.
de 24.	1/2.	546.	5,20.	4,76.	4.	3,36.	2,88.	2,44	2,08.	1,52	1,12.
de 24.	1/3.	500.	4,36.	4.	3,36.	2,88.	2,44.	2,08.	1,76.	1,32.	1.
de 24.	1/8.	300.	1,60.	1,48.	1,24.	1,08.	0,96.	0,84.	0,72.	0,56.	0,44.
de 16.	1/3.	500.	3,76.	3,40.	2,80.	2,32.	1,92.	1,60.	1,36.	1,12.	0,76.
de 12.	1/3.	500.	3,40.	3,04	2,48.	2.	1,64.	1,36.	1,12.	0,76.	0,56.
de 8.	1/3.	500.	2,92.	2,60.	2,04.	1,60.	1,28.	1,12.	0,84.	0,56.	0,40.
de 6	1/3.	500.	2,60.	2,28.	1,76.	1,36.	1,04.	0,84.	0,68.	0,44.	0,28.
de 4.	1/3.	500.	2,20.	1,88.	1,40.	1,04.	0,80.	0,60.	0,48.	0,28.	0,20.
de 3.	1/3.	460.	1,68.	1,40.	1.	0,76.	0,56.	0,40.	0,32.	0,20.	0,12.
OBUS											
de 8 pouces..	1/7.	400.	2,80.	2,56.	2,16.	1,84.	1,60.	1,36.	1,20.	0,88.	0,68.
de 8 *idem*. . .	1/26.	200.	0,72.	0,68.	0,60.	0,52.	0,48.	0,44.	0,36.	0,32.	0,28.
de 6 *id.* nouv.	1/7.	400.	2,16.	1,96.	1,60.	1,32.	1,08.	0,92.	0,76.	0,56.	0,44
de 6 *id.* anc..	1/14.	240.	0,80.	0,72.	0,64.	0,52.	0,44.	0,40.	0,36.	0,28	0,20.
de 24 *id.* nouv.	1/7.	400.	1,80.	1,60.	1,24.	1.	0,80.	0,64.	0,52,	0,36.	0,28.
de 12 *id.*.	1/16.										

BOMBES.	DENSITÉS.	PÉNÉTRATIONS DES BOMBES de 8 pouces.	de 10 pouces.	de 12 pouces.	de 15 pouces.
Ordinaires.	4m,80.	0m,36.	0m,56.	0m,76.	1m,20.
Surchargées.	7, 20.	0, 88.	1, 28.	1, 72.	2, 72.

N.° 4. *Tableau des pénétrations des projectiles dans les terres récemment remblayées et bien damées.*

PROJECTILES.	CHARGES.	VITESSES initiales.	PÉNÉTRATIONS AUX DISTANCES DE 50m.	100m.	200m.	300m.	400m.	500m.	600m.	800m.	1000m.
BALLES											
de 19 à la livre.	1/2.	500.	0,33.	0,26.	0,16.	0,08.	0,05.	0,02 1/2.	0,01 1/2.		
de 14 *idem*...	1/2.	525.	0,43.	0,33.	0,22.	0,12.	0,08.	0,03 1/2.	0,02.		
de 8 *idem*....	1/2.	525.	0,56.	0,47.	0,34.	0,19.	0,12.	0,07 1/2.	0,04 1/2.		
BOULETS											
de 48.....	1/3.	500.	6,90.	6,45.	5,65.	4,90	4,30.	3,80.	3,20.	2,60.	2,05.
de 36.....	1/3.	500.	6,25.	5,80.	5,00.	4,30.	3,75.	3,30.	2,80.	2,15.	1,65.
de 24.....	1/2.	546.	6,50.	5,95.	5,00.	4,20.	3,60.	3,05.	2,60.	1,90.	1,40.
de 24.....	1/3.	500.	5,45.	5,00.	4,20.	3,60.	3,05.	2,60.	2,20.	1,65.	1,25.
de 24.....	1/8.	300.	2,00.	1,85.	1,55.	1,35.	1,20.	1,05.	0,90.	0,70.	0,56.
de 16.....	1/3.	500.	4,70.	4,25.	3,50.	2,90.	2,40.	2,00.	1,70.	1,40.	0,95.
de 12.....	1/3.	500.	4,25.	3,80.	3,10.	2,50.	2,05.	1,70.	1,40.	0,95.	0,70.
de 8.....	1/3.	500.	3,65.	3,25.	2,55.	2,00.	1,60.	1,40.	1,05.	0,70.	0,50.
de 6.....	1/3.	500.	3,25.	2,85.	2,20.	1,70.	1,30.	1,05.	0,85.	0,55.	0,35.
de 4.....	1/3.	500.	2,75.	2,35.	1,75.	1,30.	1,00.	0,75.	0,60.	0,35.	0,25.
de 3.....	1/3.	460.	2,10.	1,75.	1,25.	0,95.	0,70.	0,50.	0,40.	0,25.	0,15.
OBUS											
de 8 pouces..	1/7.	400.	3,50.	3,20.	2,70.	2,30.	2,00.	1,70.	1,50.	1,10.	0,85.
de 8 *idem*....	1/26.	200.	0,90.	0,85.	0,75.	0,65.	0,60.	0,55.	0,45.	0,40.	0,35.
de 6 *id.* nouv.	1/7.	400.	2,70.	2,45.	2,00.	1,65.	1,35.	1,15.	0,95.	0,70.	0,55.
de 6 *id.* anc..	1/14.	240.	1,00.	0,90.	0,80.	0,65.	0,55.	0,50.	0,45.	0,35.	0,25.
de 24 *id.* nouv.	1/7.	400.	2,25.	2,00.	1,55.	1,25.	1,00.	0,80.	0,65.	0,45.	0,35.
de 12 *id.*.....	1/16.										

BOMBES.	DENSITÉS.	PÉNÉTRATIONS DES BOMBES de 8 pouces.	de 10 pouces.	de 12 pouces.	de 15 pouces.
Ordinaires.....	4m,80.	0m,45.	0m,70.	0m,95.	1m,50.
Surchargées.....	7, 20.	1, 00.	1, 60.	2, 15.	à 3, 40.

N.° 5. *Tableau des pénétrations des projectiles dans le bois de chêne supposé sain et dur.*

PROJECTILES.	CHARGES.	VITESSES initiales.	PÉNÉTRATIONS AUX DISTANCES DE 50m.	100m.	200m.	300m.	400m.	500m.	600m.	800m.	1000m.
BALLES											
de 19 à la livre.	1/2.	500.	0,05.	0,032.	0,016.	0,01.	0,006.				
de 14 *idem*. . .	1/2	525.	0,066.	0,043.	0,023.	0,014.	0,008.				
de 8 *idem*. . . .	1/2.	525.	0,085.	0,06.	0,036.	0,023.	0,016.				
BOULETS											
de 48.	1/3.	500.	2,07.	1,94.	1,70.	1,47.	1,29.	1,14.	0,96.	0,78	0,62.
de 36.	1/3.	500.	1,88.	1,74.	1,50.	1,29.	1,13.	0,99.	0,84.	0,65.	0,49.
de 24.	1/2.	546.	1,95.	1,79.	1,50.	1,26.	1,08.	0,92.	0,78.	0,57.	0,42.
de 24.	1/3.	500.	1,64.	1,50.	1,26.	1,08.	0,92.	0,78.	0,66.	0,49.	0,38.
de 24.	1/8.	300.	0,60.	0,56.	0,47.	0,41.	0,36.	0,32.	0,27.	0,21.	0,17.
de 16.	1/3.	500.	1,41.	1,28.	1,05.	0,87.	0,72.	0,60.	0,51.	0,42.	0,29.
de 12.	1/3.	500.	1,28.	1,14.	0,93.	0,75.	0,62.	0,51.	0,42.	0,20.	0,21.
de [illegible].	1/3.	500.	1,10.	0,98.	0,77.	0,60.	0,48.	0,42.	0,32.	0,21.	0,15.
de 6.	1/3	500.	0,98.	0,86.	0,66.	0,51.	0 39.	0,32.	0,26.	0,17.	0,11.
de [illegible].	1/3.	500.	0,83.	0,71.	0,53.	0,39.	0,30.	0,23.	0,18.	0,11.	0,08.
de 3.	1/3.	460.	0,63.	0,53.	0,38.	0,29.	0,21.	0,15.	0,12.	0,08.	0,05.
OBUS											
de 8 pouces..	1/7.	400.	1,05.	0,96.	0,81.	0,69.	0,60.	0,51.	0,45.	0,33.	0,26.
de 8 *idem*. . .	1/26.	200.	0,27.	0,26.	0,23.	0,20.	0,18.	0,16.	0,14.	0,12.	0,10.
de 6 *id.* nouv.	1/7.	400.	0,81.	0,74.	0,60.	0,50.	0,41.	0,35.	0,29.	0,21.	0,17.
de 6 *id.* anc..	1/14.	240.	0,30.	0,27.	0,24.	0,20.	0,17.	0,15.	0,14	0,11.	0,08.
de 24 *id.* nouv.	1/7.	400.	0,68.	0,60.	0,47.	0,38.	0,30.	0,24.	0,20.	0,14.	0,11.
de 12 *id.*.	1/16.										

BOMBES.	DENSITÉS.	PÉNÉTRATIONS DES BOMBES de 8 pouces.	de 10 pouces.	de 12 po.	de 15 pouces.
Ordinaires.	4m,80.	0m,14.	0m,21.	0m,29.	0m,45.
Surchargées.	7, 20.	0, 30.	0, 48.	0, 65.	1, 02.

N.° 6. *Tableau comparatif de l'effet des boulets et de celui des obus dans les terres fraîchement remuées et bien damées.*

PROJECTILES.	Charge.	Vitesse.	EFFETS AUX DISTANCES DE 50m.	100m.	200m.	300m.	400m.	500m.	600m.	800m.	1000m
Boulets de 24.	1/3.	500.	5,15.	5,00.	4,20.	3,60.	3,05.	2,60.	2,20.	1,65.	1,25.
Obus de 8 p.ces	1/7.	400.	5,50.	5,20.	4,70.	4,30.	4,00.	3,70.	3,50.	3,10.	2,85.
Boulets de 12.	1/3.	500.	4,25.	3,80.	3,10.	2,50.	2,05.	1,70.	1,40.	0,95.	0,70.
Obus de 6 p.ces	1/7.	400.	3,80.	3,55.	3,10.	2,75.	2,45.	2,25.	2 05.	1,80.	1,65.

N.° 7. *Tableau de résultats d'expériences sur la pénétration des balle dans le bois.*

DÉSIGNATION des armes.	ESSENCE du bois.	PÉNÉTRATIONS OBTENUES AUX DISTANCES DE 3m.	6m,5.	16m.	22m.	40m.	60m.	107m.	160m.
Fusil de munition..	Chêne dur.	9c,5.	9c,4.	6c.	//	//	//	2c.	//
Fusil de rempart....	*Idem.*	//	//	//	11c.	5c.	4c.	//	//
Idem dit renforcé...	*Idem.*	//	//	//	//	//	//	//	11c.
Fusil de m.on à clapet.	*Idem.*	//	//	//	//	//	//	11.	//
Fusil de munition..	Orme.	10, 8.	//	9.	//	//	//	//	//
Fusil de rempart...	*Idem.*	//	//	12.	//	//	7.	//	4.
Fusil de munition..	Sapin.	17, 1.	//	13.	//	//	//	//	//
Fusil de rempart ..	*Idem.*	//	//	//	18.	//	//	//	//

N.° 8. *Tableau des pénétrations dans la maçonnerie.*

PROJECTILES.	Charges	Maçonnerie.	PÉNÉTRATIONS AUX DISTANCES DE 50m.	100m.	200m.	300m.	400m.	500m.	600m.	800m.	1000m
Boulets de 24.	1/2.	De moellons.	0,91.	0,83.	0,70.	0,59.	0,50.	0,43.	0,36.	0,27.	0,20.
Idem.....	1/3.		0,73.	0,70.	0,59.	0,50.	0,43.	0,36.	0,31.	0,23.	0,18.
Boulets de 12.	1/3.		0,43.	0,38.	0,31.	0,25.	0,21.	0,17.	0,14.	0,10.	0,07.
Boulets de 24.	1/2.	De briques.	1,30.	1,19.	1,00.	0,84.	0,72.	0,61.	0,52.	0,38.	0,28.
Idem.....	1/3.		1,09.	1,00.	0,84.	0,72.	0,61.	0,52.	0,44.	0,33.	0,25.
Boulets de 12.	1/3.		0,85.	0,76.	0,62.	0,50.	0,41.	0,34.	0,28.	0,19.	0,14.

BOMBES.	DENSITÉS.	PÉNÉTRATIONS DES BOMBES de 8 pouces.	de 10 pouces.	de 12 pouces.	de 15 pouces.
Ordinaires.....	4m,80.	0m, 09.	0m, 14.	0m, 19.	0m, 30.
Surchargées.....	7, 20.	0, 20.	0, 32.	0, 43.	0, 68.

MÉMOIRE

SUR UN SYSTÈME DE VANNES

À AXES HORIZONTAUX,

APPLICABLE AUX BARRAGES DES RIVIÈRES SUJETTES À DES CRUES SUBITES, AINSI QU'AUX ÉCLUSES DE CHASSE ET DE FUITE DES PLACES DE GUERRE;

Par M. le Capitaine du génie PETITOT.

On appelle *vannes* des espèces de portes qui, dans les moulins, les pertuis, les écluses, retiennent les eaux ou leur donnent passage *suivant le besoin*. Les unes se manœuvrent en *glissant verticalement* dans des feuillures ou coulisses, soit au moyen d'une simple queue, soit par des engrenages; les autres tournent autour d'un axe vertical qui sépare leurs surfaces en deux parties inégales; d'autres enfin se composent d'une suite de poutrelles, placées les unes sur les autres, et qu'on enlève une à une, comme dans quelques pertuis de navigation, et dans certaines écluses de places fortes.

Lorsque ces vannes ont à soutenir une hauteur d'eau considérable, elles présentent souvent beaucoup de difficultés dans leurs manœuvres, à cause des frottemens à vaincre; et si cette manœuvre doit s'exécuter avec promptitude, comme dans le cas

où elle concourt à la défense d'une place attaquée, il est rare qu'elle remplisse son objet, et que quelque vice de construction des vannes, même léger, ne paralyse l'effet des eaux dans les fossés à défendre (1).

Je m'occupais à chercher un nouveau système de vannage dont la manœuvre fût plus sûre et plus facile, lorsque, de concert avec l'ingénieur ordinaire des ponts et chaussées, j'ai dû rédiger un projet de pont éclusé, qui, outre les conditions nécessaires à la défense de la place où je me trouve, pût, par sa construction, donner le moyen d'obvier aux débordemens fréquens de la rivière sur laquelle il devait être établi; débordemens qui détruisent presque chaque année les récoltes d'une vallée fertile, et dont la cause réside dans un barrage nécessaire à des moulins et à un pertuis de navigation.

Pour résoudre cette question, je me suis proposé d'adapter au barrage de la rivière un appareil de vannes tel, qu'au moment d'une crue subite ces vannes puissent s'ouvrir d'elles-mêmes pour donner aux eaux une suite de passages de fond, dont la somme des largeurs soit au moins égale à la largeur moyenne de la rivière en amont.

Ce système remplissant la condition essentielle de prévenir les accidens causés par la rivière, j'ai

(1) Les vannes à axe vertical qu'on emploie maintenant pour les écluses de chasse, et qui sont les moins imparfaites, ont cependant l'inconvénient de s'affaisser peu à peu sous leur propre poids, et de finir par appuyer contre le radier de manière à ne pouvoir tourner sur leur pivot. Ce mouvement peut en outre être gêné par les amas de grève qui se forment au pied des vannes, et qui, refoulés sur eux-mêmes, augmentent de plus en plus la résistance.

vu qu'il se prêtait aussi très-aisément, au moyen de quelques accessoires fort simples, à la manœuvre des écluses militaires dont on fait usage dans les places de guerre, et qu'il rentrait ainsi dans l'objet de mes premières recherches.

D'une construction simple et solide, les vannes que je propose diffèrent des vannes ordinaires par leur suspension à des tourillons horizontaux, autour desquels elles peuvent prendre différentes inclinaisons pour augmenter le débouché des eaux suivant le besoin, et le reporter même à ce qu'il serait si le barrage n'existait pas. Ces tourillons reposent sur des crapaudines en cuivre placées dans des montans verticaux, auxquels sont pratiquées des feuillures qui ne permettent aux vannes qu'un mouvement de renversement en aval.

Les vannes à axes horizontaux ne sont pas une invention nouvelle à laquelle on n'eût pas songé encore ; en Hollande, la plupart des clapets qui donnent sortie aux eaux de l'intérieur des terres, au moment des marées basses, et qui s'opposent à l'entrée des eaux de la mer à l'instant du flot, ne diffèrent des vannes dont il s'agit, qu'en ce que l'axe de rotation est constamment placé près du sommet de la vanne. On trouve d'ailleurs, dans les *Constructions hydrauliques* de M. Cessart, un projet de vannes semblablement suspendues pour fermer les écluses des ports de mer, et donner la chasse aux alluvions, au moyen d'un mécanisme manœuvré par les éclusiers. Mais si ces différentes vannes ont beaucoup d'analogie avec celles que j'ai en vue, quant à leur mode de suspension, elles en diffèrent

essentiellement quant à leur objet, et quant au principe mécanique sur lequel elles sont établies.

Le système que je propose a pour objet, en effet, de prévenir les débordemens d'une rivière, en ouvrant de lui-même un débouché de fond qui en général abaisse le niveau primitif des eaux, et de reporter ensuite ce niveau à la hauteur convenable pour le service des usines situées à l'amont du barrage; ce qui exige que les vannes étant en équilibre un peu avant que l'eau n'atteigne la limite où elle pourrait déborder ou gêner les usines, elles s'inclinent spontanément, si l'eau s'élève encore, et se redressent de même lorsque le régime habituel de la rivière se trouve rétabli.

L'explication de ce système va résulter, au surplus, des calculs mêmes sur lesquels est fondée sa manœuvre spontanée.

PROBLÈME.

Une vanne barre une rivière; elle est maintenue dans une position verticale entre deux pieds-droits, au moyen d'un axe horizontal autour duquel elle peut tourner; les eaux d'amont et les eaux d'aval qui appuient contre elle, tendent à la faire mouvoir autour de cet axe, qui est placé à une certaine distance du bord inférieur de la vanne; enfin le frottement que les tourillons exercent dans les crapaudines, tend à empêcher ce mouvement.

Il s'agit d'établir les conditions d'équilibre de cette vanne, et d'en former une équation générale dans laquelle entrent la hauteur des eaux d'amont, celle

des eaux d'aval, et la hauteur des tourillons à partir du pied de la vanne; en sorte qu'en assignant à deux de ces trois indéterminées les valeurs qui leur conviennent suivant les circonstances particulières dans lesquelles la vanne doit se trouver, on puisse en conclure la valeur que doit avoir la troisième, pour que, la vanne étant dans un équilibre parfait, le plus petit effort suffise pour la mettre en mouvement.

SOLUTION.

Puisque la vanne est assujettie à tourner autour d'un axe fixe, il suffit, pour établir les conditions de son équilibre, d'exprimer que la somme des momens des pressions qui tendent à la faire tourner dans un sens, est égale à la somme des momens des pressions et des résistances qui tendent à la faire tourner ou à la retenir dans l'autre sens.

Pl. II, f. 1. Soit h la hauteur de la vanne (que l'on supposera, pour simplifier, être sans épaisseur);

b sa largeur;

d la distance de son bord inférieur à l'axe des tourillons;

H la hauteur du niveau de l'eau d'amont au-dessus du radier, lorsque, dans sa position verticale, la vanne a forcé les eaux à s'élever par-dessus son sommet;

x la hauteur des eaux d'aval au-dessus du bord inférieur de la vanne, dans la même circonstance;

p le poids total de cette vanne;

r le rayon des tourillons;

f le rapport du frottement à la pression;

ϱ le poids spécifique de l'eau.

La pression exercée par l'eau contre une surface, étant égale au poids d'un prisme d'eau qui aurait pour base la surface pressée et pour hauteur la distance du centre de gravité de cette surface au niveau de l'eau, il s'ensuit qu'en désignant par z la distance d'un élément quelconque horizontal de la vanne au niveau de l'eau, on aura pour le moment de la pression exercée contre cet élément, l'expression différentielle

$$\varrho b z dz \times K,$$

K étant la distance de l'élément à l'axe de rotation, laquelle distance est nécessairement une fonction de z. Si maintenant on détermine cette distance dans chaque cas, et qu'on intègre l'expression différentielle entre les limites convenables, on aura :

Pour le moment de la pression exercée par l'eau d'amont contre la partie de la vanne supérieure à l'axe de rotation, l'expression

$$(a)\ldots \quad \frac{\rho b}{6}(h-d)^2(3H-2h-d);$$

Pour le moment de la pression d'amont exercée contre la partie de la vanne inférieure à l'axe, l'expression

$$(b)\ldots \quad \frac{\rho b}{6} d^2(3H-d);$$

Pour le moment de la pression d'aval, l'expression

$$(c)\ldots \quad \frac{\rho b}{6} x^2(3d-x);$$

Et enfin pour le moment du frottement, l'expression

$$(d)\ldots\ fr\sqrt{\varrho^2 b^2 (2Hh-h^2-x^2)^2+4p^2}.$$

L'équation d'équilibre qui se formera en égalant la somme des momens (a) et (c) à la somme des momens (b) et (d), sera donc, toutes réductions faites,

$$\ldots\ \frac{pb}{3}\left\{x^2(3d-x)+h^2(3H-2h+3d)-6hdH\right\}$$
$$\mp fr\sqrt{\varrho^2 b^2 (2Hh-h^2-x^2)^2+4p^2}=0,$$

dans laquelle le double signe du radical comprend le cas où la vanne serait prête à se renverser en aval, et celui où elle serait prête à se renverser en amont: deux cas en effet pour lesquels le frottement résiste en sens contraire (1).

APPLICATIONS.

Pour appliquer les vannes mobiles à un barrage de rivière qui, sans occasionner des débordemens nuisibles, puisse élever les eaux à une certaine hauteur nécessaire pour les usines établies en amont, il faudra, après avoir fixé le seuil du radier, déterminer la hauteur et la longueur des vannes, de manière que

(1) On n'a pas tenu compte, dans l'équation d'équilibre, des momens du poids de la vanne, parce qu'on a supposé qu'au moyen des ferrures, les deux parties de cette vanne situées de part et d'autre de l'axe de rotation sont arrangées de façon que leurs momens soient égaux.

dans le temps des plus basses eaux, la retenue ait toujours l'élévation convenable, et que, d'un autre côté, le débouché de la rivière ne soit point rétréci sur sa largeur dans le cas des inondations. Cette détermination se fera donc en donnant aux vannes une somme de longueurs égale au moins à la largeur de la rivière en amont, et une hauteur égale à la différence entre la cote des eaux nécessaires au service des usines et la hauteur du radier augmentée de l'épaisseur de la section courante des basses eaux rapportée à l'étendue que prend le lit de la rivière vers cette même hauteur du niveau propre aux usines. Mais comme il n'est pas nécessaire que les vannes se renversent pour le plus léger surcroît d'eau qui arriverait contre le vannage ainsi déterminé, on prendra pour H, dans l'équation d'équilibre, une quantité égale à la hauteur des plus hautes eaux que puissent supporter les usines dont il s'agit, ou bien égale à la hauteur des plus hautes eaux qui ne causent point d'inondations (si cette dernière hauteur était moindre que la première), moins la hauteur du radier dans l'un et l'autre cas.* Quant à la hauteur x de l'eau d'aval au-dessus du radier, elle devrait être représentée par l'épaisseur du courant qui passe par-dessus les vannes, augmentée en proportion du rétrécissement du lit de la rivière vers le seuil du radier, et par conséquent se former en augmentant dans cette proportion la différence de la hauteur H à la hauteur des vannes; mais il faut remarquer que l'établissement d'un barrage donne, en général, naissance à des déversoirs latéraux par lesquels les eaux affluent à l'aval sans passer par-dessus les vannes, en sorte que la

hauteur des eaux d'aval sera presque toujours plus grande que celle qu'on déduirait de l'état des eaux d'amont. On déterminera donc cette hauteur par l'observation, lorsque le vannage sera mis en place.

Les valeurs de H et de x étant ainsi trouvées et substituées dans l'équation générale (A), on tirera de cette équation la quantité d, c'est-à-dire, la hauteur à laquelle on doit placer les tourillons, à partir du pied des vannes, pour que la moindre augmentation des eaux occasionne le mouvement de rotation de ces vannes.

Or, l'équation (A), résolue par rapport à d, donne

$$(B)\ldots\quad d = \frac{x^3 - h^2(3H - 2h) \pm \frac{3fr}{\rho b}\sqrt{\rho^2 b^2 (2Hh - h^2 - x^2)^2 \times 4p^2}}{3(x^2 + h^2 - 2Hh)}.$$

Il sera donc toujours extrêmement facile de faire la détermination dont il s'agit.

On peut remarquer que dans cette expression de d, le terme $4p^2$, placé sous le radical, devant être multiplié par le coefficient $\frac{\rho f^2 r^2}{\rho^2 b^2}$, deviendra une fort petite quantité, qu'on pourra toujours négliger sans craindre de faire une trop grande erreur. Alors on aura simplement,

$$(B')\ldots\quad d = \frac{x^3 - h^2(3H - 2h) \pm 3fr(2Hh - h^2 - x^2)}{3(x^2 + h^2 - 2Hh)};$$

Mais on n'aura égard, dans ces expressions, qu'au signe supérieur du moment du frottement, puisqu'il ne s'agit ici que du cas où les vannes doivent tendre à se renverser en aval.

Si maintenant on se donne les quantités H et d, et qu'on veuille déterminer quelle doit être la hauteur x des eaux d'aval pour que la plus petite augmentation de cette hauteur fasse renverser le vannage de la même manière que ci-dessus, il faudra résoudre l'équation (A) par rapport à x. Cette équation peut être mise d'abord sous la forme

$$(A')\ldots [x^2(3d-x)+h^2(3H+3d-2h)-6Hhd]^2 = 9f^2r^2(2Hh-h^2-x^2)^2+\frac{36p^2f^2r^2}{\varrho^2b^2},$$

qui fait voir qu'elle sera en général du sixième degré. Mais si l'on néglige le dernier terme du second membre, qui, d'après ce qu'on a dit, sera toujours une quantité fort petite, elle se réduira au troisième degré, et sera

$$x^3-3(d+fr)x^2+3fr(2Hh-h^2) -h^2(3H-2h-3d)+6h(H-h)=0.$$

Le terme qu'on a supprimé correspond, comme il est aisé de le voir, au moment de la portion de frottement qui proviendrait du poids de la vanne en particulier. Pour montrer combien peu ce terme influe sur la valeur de x, prenons un exemple, et supposons

h = 2 mètres,
b = 2 mètres,
r = $0^m,02$,
f = $\frac{1}{6}$,
ϱ = 1000 kilogrammes,

$p = 500$ kilogrammes,

$H = h = 2$ mètres,

$d = \frac{1}{3} h$.

L'équation (A') devient dans ce cas

$$x^6 - 4x^5 + (3,999)x^4 + (0,0008)x^3 - 0,001625 = 0,$$

laquelle comprend deux racines imaginaires et quatre racines réelles, dont celle qui correspond à la question est

$$x = 0^m,1471.$$

Mais si l'on eût préalablement supprimé le terme dont il a été parlé, l'équation (A') se fût réduite à celle-ci,

$$x^2(h - x) = 3fr(h + x)(h - x),$$

qui, dans le cas particulier qu'on examine, serait devenue

$$x^2(2 - x) = (0,01)(2 + x)(2 - x).$$

Supprimant le facteur commun $(2 - x)$, qui, bien qu'il exprime une chose vraie, n'est pas celui qui répond à la question, on tirera de l'équation restante

$$x = 0^m,1465;$$

par où l'on voit que les deux valeurs de x ne diffèrent entre elles que de 0^m, 0006 tout au plus.

On pourra donc toujours, sans erreur sensible, et dans toutes les hypothèses à faire sur les données

qui entrent dans l'équation générale, simplifier beaucoup les calculs, en supprimant le terme dépendant de la portion de frottement qui correspond au poids de la vanne; ce qui reviendra à faire $p = 0$ dans cette équation générale.

Tels sont les calculs par lesquels s'établira dans tous les cas l'équilibre des vannes dans la position verticale où elles ferment la retenue de la *rivière*. Voyons maintenant ce qui arrivera lorsqu'une crue des eaux viendra les déranger de cette position.

Je dis que, dans ce cas, il pourra se passer deux effets distincts : si l'affluence de l'eau est subite et considérable, les vannes se renverseront d'un mouvement continu, jusqu'à la position horizontale; mais si l'eau de la crue n'arrive qu'insensiblement, en petite quantité, le mouvement des vannes s'arrêtera lorsque le nouvel écoulement résultant de leur inclinaison, ayant fait baisser le niveau de l'eau au-dessous de ce qu'il était primitivement, sera suffisant pour débiter à-la-fois les eaux ordinaires et les eaux accidentelles de la rivière. Dans l'un et l'autre cas, les vannes reprendront d'elles-mêmes leur position primitive d'équilibre ou de stabilité, lorsque les eaux de la crue auront totalement disparu.

Pour montrer comment le calcul conduit à ces conclusions, je vais prendre les momens des pressions de l'eau sur une vanne inclinée d'une manière quelconque. Soit φ l'angle de cette inclinaison, c'est-à-dire, l'angle que la vanne fait avec le plan vertical; on aura, en conservant d'ailleurs les mêmes désignations que ci-dessus :

Pour le moment de la pression d'amont au-dessus de l'axe de rotation, l'expression

$$\frac{\rho b}{6\cos.^2\varphi}\left\{(H-d)^3-[H-d-(h-d)\cos.\varphi]^2[H-d+2(h-d)\cos.\varphi]\right\};$$

Pour le moment de la pression d'amont au-dessous de l'axe, l'expression

$$\frac{\rho b}{6.\cos.^2\varphi}\left\{(H-d)^3-(H-d+d\cos.\varphi)^2(H-d-2d\cos.\varphi)\right\};$$

Pour le moment de la pression d'aval, l'expression

$$\frac{\rho b}{6.\cos.^2\varphi}\left\{(x-d+\cos.\varphi)^2(d-x+2d\cos.\varphi)\right\};$$

Et enfin pour le moment du frottement, l'expression

$$fr\sqrt{\frac{\rho^2b^2}{6.\cos.^2\varphi}\left\{(H-d+d\cos.\varphi)^2-[H-d-(h-d)\cos.\varphi]^2-(x-d+d\cos.\varphi)^2\right\}+p^2-\frac{p.\rho b}{\cos.\varphi}\cos.\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)}$$
$$\sqrt{(H-d+d\cos.\varphi)^2-[H-d-(h-d)\cos.\varphi]^2-(x-d+d\cos.\varphi)^2}.$$

Si l'on néglige la portion de frottement provenant du poids de la vanne, et qu'on appelle D la différence de la somme des momens (1) et (3) à la somme des momens (2) et (4), on aura

$$D=\frac{\rho b}{6}\left\{3h(h-2d-2fr)(H-d)-3d(d-x)(d+2fr)\right.$$
$$\left.-(h-d)^2(2h-2d-3fr)\cos.\varphi+\frac{3fr(d-x)^2}{\cos.\varphi}+\frac{(d-x)^3}{\cos.^2\varphi}\right\}.$$

On voit, par cette expression, qu'à partir de la position verticale d'équilibre, où la différence D serait égale à zéro, cette différence croîtra positivement avec H; c'est-à-dire que si l'eau vient à s'élever derrière une vanne en équilibre, cette vanne doit immédiatement commencer à se renverser.

La même expression de D fait voir que, pour une valeur de H toujours la même, c'est-à-dire, pour un niveau qu'on supposerait, par abstraction, rester à la même hauteur, la différence des momens des pressions qui tendent à renverser la vanne, à ceux des pressions qui tendent à la retenir, va toujours en croissant, à mesure que l'angle d'inclinaison augmente, puisque des trois termes de l'expression où se trouve cet angle d'inclinaison, le terme négatif diminue, pendant que les deux termes positifs augmentent au contraire.

Il suit des deux remarques précédentes que si la vanne en équilibre commence à s'incliner par l'action d'une crue, elle s'inclinera toujours davantage, tant que l'écoulement de fond qui en résultera ne rabaissera pas le niveau de l'eau au-dessous de sa hauteur primitive.

L'effet d'une crue sera donc, soit de renverser tout-à-fait les vannes du barrage, soit de leur faire prendre une position inclinée, et, dans tous les cas, d'abaisser le niveau de la retenue au-dessous de la cote d'équilibre du vannage. Si cet abaissement était assez grand pour interrompre le service des usines, il faudrait relever les vannes avec des chaînes, ou par tout autre mécanisme qu'on voudrait, et les

maintenir de force à une moindre inclinaison, pour tendre la retenue au point convenable.

Au surplus, il ne serait pas impossible d'établir un système qui maintînt le niveau de l'eau au-dessus d'une limite déterminée, sans le secours d'aucune action étrangère. Il suffirait, pour cela, de donner aux débouchés du vannage des largeurs différentes, et de placer l'axe de rotation des vannes à des hauteurs aussi inégales. Le régime de la rivière étant connu, il faudrait diviser les crues qu'elle peut éprouver annuellement en plusieurs hypothèses, et calculer en conséquence la grandeur des vannes, ainsi que la position de leur axe. Il est aisé de concevoir que ces vannes, se renversant, suivant la hauteur des crues, les unes entièrement, les autres à demi, pourraient être combinées de manière que le niveau de l'eau restât à peu près stationnaire entre les limites requises pour le service des usines. La question suivante mettra sur la voie de ces sortes d'évaluations.

La hauteur d'une crue étant donnée, trouver, dans l'hypothèse d'un vannage uniforme, l'inclinaison que prendront les vannes, et l'abaissement du niveau de l'eau qui en résultera.

Pour résoudre cette question, reprenons d'abord l'équation (5), et égalons à zéro son second membre. On aura par-là l'équation générale d'équilibre d'une vanne inclinée, laquelle équation, ordonnée par rapport aux puissances de $\cos.\varphi$, sera

$$(h-d)^2(2h-2d-3fr)\cos.^3\varphi + \left\{3d(d-x)(d+2fr)-3h(H-d)(h-2d-2fr)\right\}\cos.^2\varphi - 3fr(d-x)^2\cos.\varphi-(d-x)^3=0.$$

Dans le cas où l'eau d'aval ne s'éleverait que jusqu'au bord inférieur de la vanne inclinée, c'est-à-dire, dans le cas où la pression d'aval serait nulle, ce qui comprend celui où il n'y aurait point d'eau en aval, on devra faire $x = d(1 - \cos.\varphi)$ dans l'équation précédente, qui donnera alors

$$(7)\ldots \quad \cos.\varphi = \frac{3h(H-d)(h-2d-fr}{2[(h-d)^3+d^3]-3frh(h-2d)}.$$

En ordonnant, d'un autre côté, par rapport à d, l'équation (6), elle se changera en cette autre,

$$(8)\ldots \quad \left\{\begin{array}{l}(3\cos.^2\varphi-2\cos.^3\varphi-1)d^3\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\ +[(6h-3fr)\cos.^3\varphi+(6fr-3x-6h)\cos.^2\varphi-3fr\cos.\varphi+3x]d^2\\ +[3h(2H+h-2fr-6frx)\cos.^2\varphi-6h(h-fr)\cos.^3\varphi+6frx\cos.\varphi-3x^2]d\\ +[h^2(2h-3fr)\cos.^3\varphi-3Hh(h-2fr)\cos.^2\varphi-3frx\cos.\varphi+x^3]\end{array}\right.$$

laquelle se présente plus commodément pour en tirer d, lorsque la hauteur de l'eau et l'inclinaison de la vanne seront données.

Si l'on suppose la vanne verticale, c'est-à-dire, si l'on fait $\cos.\varphi = 1$ dans l'équation (8), elle donnera

$$(9)\ldots \quad d = \frac{x^3-h^2(3H-2h)+3fr(2Hh-h^2-x^2)}{3[x^2-h(2H-h)]},$$

ainsi qu'on l'a trouvé directement (*voyez* équation B').

Enfin, si l'on admet qu'il n'y a point d'eau en aval, la valeur de d se réduira à

$$(10)\ldots \quad d = \frac{h(3H-2h)}{3(2H-h)} - fr.$$

Je reviens maintenant à la question; mais, pour

aller du simple au composé, je prendrai d'abord le cas où il n'y aurait point d'eau en aval.

La hauteur de l'axe de rotation étant déterminée par l'équation (10), c'est-à-dire, par la condition que les vannes soient en équilibre dans leur position verticale et pour une valeur donnée de H, s'il survient une crue qui dût changer H en $H + n$, le vannage se renverse immédiatement et prend ensuite une position inclinée, lorsque, par l'effet du nouvel écoulement, les eaux ont baissé convenablement et que $H + n$ s'est changé en $H' < H$.

Si l'on connaissait cette quantité H', on aurait, en la substituant dans l'équation (7), la valeur de cos. φ, et par conséquent l'inclinaison du vannage; mais comme on n'a jusqu'ici que cette seule équation entre H' et cos. φ, on voit que le problème resterait indéterminé, si le vannage incliné ne devait en outre satisfaire à une nouvelle condition, qui est que l'écoulement actuel de l'eau par-dessous et par-dessus les vannes soit égal à celui qui aurait eu lieu par-dessus seulement, si les vannes eussent été maintenues par une force dans leur position verticale, à l'instant de l'arrivée de la crue; c'est-à-dire qu'il faut que l'écoulement actuel débite à-la-fois les eaux ordinaires et les eaux accidentelles de la rivière, afin qu'il y ait permanence dans la position du vannage.

Or, en désignant par L la somme des longueurs des vannes, par b la distance du seuil du radier au niveau de l'eau, par l' et l'' les distances respectives de ce niveau aux bords inférieur et supérieur des vannes inclinées, et par g la pesanteur,

on aura pour le volume d'eau qui passe chaque seconde par le dessous des vannes, l'expression

$$(m)\ldots \quad \tfrac{2}{3} L (0,62) (l^{\frac{3}{2}} - l'^{\frac{3}{2}}) \sqrt{2g};$$

(Voyez les *mémoires* de M. de Prony, *sur la mesure des eaux courantes.*)

et pour le volume d'eau, qui passe par le dessus des vannes dans le même temps, l'expression

$$(n)\ldots \quad \tfrac{2}{3} L (0,6333) l''^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} \text{ (1).}$$

Mais si les vannes fussent restées fixes dans la position verticale malgré l'arrivée de la crue, la hauteur H se serait changée en $H+n$, et le volume d'eau qui aurait passé chaque seconde par le dessus des vannes aurait eu pour valeur l'expression

$$(p)\ldots \quad \tfrac{2}{3} L (0,6333) (H - h + n)^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g}.$$

La nouvelle condition à établir sera donc que la somme des expressions (m) et (n) soit égale à l'expression (p). Sur quoi l'on doit remarquer que, H', étant par hypothèse la hauteur actuelle du niveau de l'eau au-dessus du radier, on a

$$l = H',$$
$$l' = H' - d(1 - \cos.\varphi),$$
$$l'' = H' - h + (h - d)(1 - \cos.\varphi),$$

(1) On a adopté, pour ces différentes formules de la dépense d'eau par-dessus et par-dessous le vannage, les coefficiens relatifs à la contraction de la veine fluide qui paraissent les plus usités; cependant on doit avertir que les auteurs qui ont écrit sur l'hydraulique ne sont pas entièrement d'accord entre eux sur ce point.

et que par conséquent l'équation résultant de la condition à établir, sera

$$(0,62)\left[H^{\frac{3}{2}} - (H'-d)(1-\cos.\varphi)^{\frac{3}{2}}\right] + (0,6333)\left[H'-d-(h-d)\cos.\varphi\right]^{\frac{3}{2}} = (0,6333)(H-h+n)^{\frac{3}{2}}.$$

On doit toutefois faire observer à l'égard de cette équation, qu'elle suppose que la retenue forme un bassin stagnant, dont les eaux n'ont aucune vîtesse, au moment où elles vont s'échapper par le vannage. Cette hypothèse n'a en général rien que d'admissible dans la pratique : on sait en effet que le résultat d'un barrage sur une rivière est un remous qui s'étend plus ou moins loin en amont, et contre lequel la vîtesse du courant s'amortit successivement, en sorte qu'il n'existe plus qu'un mouvement très-lent à l'approche du débouché des eaux.

La hauteur H avant la crue étant donnée, ainsi que la hauteur n de cette crue, la question dont il s'agit se réduira maintenant à déterminer H' et cos. φ, au moyen des équations (7) et (11); opération qui, à cause des puissances fractionnaires dont les termes de l'équation (11) se trouvent affectés, exigera la résolution d'une équation numérique du douzième degré.

Si l'on retournait le problème; c'est-à-dire, si l'on se donnait l'abaissement du niveau de l'eau après l'ouverture des vannes, et qu'on se proposât de trouver la hauteur de la crue qui a dû produire cet abais-

sement, l'opération ne coûterait plus que l'extraction d'une racine.

Supposons, pour prendre dans cette dernière hypothèse un cas que la pratique puisse présenter,

$$H = 3^{m},50,$$
$$h = 3^{m},$$
$$f = \frac{1}{6},$$
$$r = 0^{m},02,$$
$$H' = h = 3^{m}.$$

On voit qu'on admet par ces données que le niveau de l'eau se sera abaissé de 50 centimètres après l'inclinaison des vannes.

L'équation (10) donnera d'abord

$$d = 1^{m},121667.$$

Puis l'équation (7) donnera, en y mettant pour H, $H' = h$,

$$\cos.\varphi = 0,7897458, \qquad \text{d'où } \varphi = 37^{\circ}\,50'\,17''.$$

Enfin l'équation (11) donnera, après qu'on y aura substitué pour cos. φ sa précédente valeur,

$$n = 0^{m},38747.$$

D'où l'on conclut qu'il suffirait d'une crue de $0^{m},387$ environ pour produire un abaissement de niveau de 50 centimètres.

L'équation (7) montre que plus l'abaissement du niveau est considérable, plus l'inclinaison des vannes

doit être grande ; mais plus cette inclinaison est grande, plus il passe d'eau par le vannage incliné et par conséquent plus la crue correspondante a dû être forte.

Si l'on eût voulu résoudre la question dans la supposition où il y aurait en aval une hauteur d'eau égale à x, au lieu de se servir des équations (10), (7) et (11), il eût fallu employer les équations (9) et (6), et une nouvelle équation analogue à l'équation (11), mais dans laquelle on aurait eu égard au ralentissement de l'écoulement causé par la présence de l'eau d'aval. Cette équation aurait donc été

$$(12)\ldots\quad (0{,}62)\left\{(H'-x)^{\frac{3}{2}}-\left[H'-x-d(1-\cos.\varphi)\right]^{\frac{3}{2}}\right\}$$
$$+(0{,}6333)\left[H'-d-(h-d)\cos.\varphi\right]^{\frac{3}{2}}$$
$$=(0{,}6333)\,(H-h+n)^{\frac{3}{2}},$$

Si l'abaissement de l'eau après l'inclinaison du vannage était donné par le fait, et qu'on voulût déterminer de combien il faut relever les vannes pour reporter le niveau à sa cote primitive, il faudrait résoudre par rapport à cos. φ l'équation (11) ou l'équation (13), dans lesquelles on aurait substitué à la place de H' la hauteur primitive de l'eau. Cette détermination dépendra aussi, comme on voit, d'une équation numérique du douzième degré.

Les calculs et les raisonnemens précédens sont établis dans la supposition que les vannes n'ont aucune épaisseur et sont réduites à un plan mathématique passant par l'axe de rotation. Dans la réalité, cette épaisseur des vannes est toujours fort petite

par rapport à leur hauteur, en sorte qu'il est permis de penser qu'elle ne doit exercer qu'une légère influence dans les circonstances d'équilibre et d'écoulement qu'on vient d'analyser. Toutefois, pour lever tous les doutes, je vais calculer cette influence.

On a vu que, lorsque la vanne est réduite à un plan sans épaisseur, l'effet de son inclinaison et de l'élévation du niveau d'amont est de favoriser les momens des pressions qui tendent à la renverser en aval.

Lorsqu'au contraire les deux surfaces de la vanne sont séparées par un intervalle sensible, et tournent autour d'un axe situé entre elles, il est aisé de voir que l'effet de cette rotation est d'élever la surface d'amont vers le niveau des eaux d'amont, et d'abaisser la surface d'aval au-dessous du niveau des eaux d'aval; ce qui revient, quant à l'action de l'eau sur ces surfaces, à diminuer sa hauteur en amont, et à l'augmenter en aval. Et comme pendant la rotation de la vanne, la ligne de séparation des pressions qui tendent à la faire tourner dans l'un et l'autre sens, reste la même sur chaque surface, on peut en conclure que si la prédominance des momens qui tendent à renverser la vanne, va en croissant par l'effet propre de l'inclinaison, elle va au contraire en décroissant par l'effet du transport des surfaces pressées, qu'occasionne le même mouvement de rotation.

Voyons quel sera le résultat de ces deux effets contraires; et d'abord remarquons qu'en rendant aux vannes l'épaisseur qu'elles ont dans la pratique, il devient nécessaire d'en tailler le bas en biseau vers

l'aval, afin que les grèves ne puissent pas se loger entre elles et le radier, lorsqu'elles ont un commencement d'inclinaison, et que d'un autre côté le débouché de l'eau s'ouvre plus immédiatement, et soit plus élargi aussitôt que les vannes commencent à tourner sur leur axe. Ce biseau devra former un plan à 45 degrés sur le champ de la vanne, ainsi que le représente la figure 1.

Cela posé, si l'on désigne par c la demi-épaisseur des vannes, ce qui donne $2c$ pour leur épaisseur totale, ainsi que pour la hauteur du biseau, on aura :

Pour le moment de la pression d'amont au-dessus de l'axe de rotation, l'expression

$$\frac{\rho b}{6.\cos.^2\varphi}\left\{(H-d-c\sin.\varphi)^3-[H-d-c\sin.\varphi-(h-d)\cos.\varphi]^3\right.$$
$$\left.[H-d-c\sin.\varphi-2(h-d)\cos.\varphi]\right\};$$

Pour le moment de la pression d'amont au-dessous de l'axe de rotation, l'expression

$$\frac{\rho b}{6.\cos.^2\varphi}\left\{(H-d-c\sin.\varphi)^3-(H-d-c\sin.\varphi+d\cos.\varphi)^3\right.$$
$$\left.(H-d-c\sin.\varphi-2d\cos.\varphi)\right\};$$

Pour le moment de la pression d'aval prise jusqu'au biseau exclusivement, l'expression

$$\frac{\rho b}{6.\cos.^2\varphi}\left\{[s-d+(d-2c)\cos.\varphi+c\sin.\varphi]^3\right.$$
$$\left.[d-s+2(d-2c)\cos.\varphi-c\sin.\varphi]\right\};$$

Pour le moment de la pression d'aval sur le biseau même, l'expression

$$\frac{\rho b}{6}\left\{c[12(d-c)(s-d)+(12d^2-24cd+20c^2)\cos.\varphi-8c^2\sin.\varphi]\right\}.$$

Et enfin, si l'on pose

$$\frac{\rho l}{2.\cos.\varphi}\left\{(H-d-c\sin.\varphi)\,2h\cos.\varphi-h(h-2d)\cos.^2\varphi-[x-d+(d-2c)\cos.\varphi+c\sin.\varphi]^2\right\}=m,$$

$$2\delta bc\sqrt{2}\left\{x-d+(d-c)\cos.\varphi\right\}=m',$$

on aura pour le moment du frottement autour de l'axe, l'expression

$$(5)'\ldots \qquad fr\sqrt{m^2+m'^2-mm'\sqrt{2}},$$

et l'équation d'équilibre du vannage se formerait en égalant la somme des momens (1)', (3)' et 4)', à la somme des momens (2)' et (5)'.

Mais cette équation serait compliquée, à cause du radical, qu'il faudrait faire disparaître, en élevant le reste de l'équation au carré. Pour la simplifier, on peut faire une hypothèse très-admissible, ce me semble, et qui consiste à substituer au moment du frottement réel celui qu'on trouverait dans la supposition où le biseau du bas de la vanne n'existerait pas. On conçoit en effet que si l'existence de ce biseau peut influer d'une manière appréciable sur la valeur respective des momens des pressions autour de l'axe, elle ne saurait modifier que d'une quantité tout-à fait insensible le moment du frottement qui s'exerce autour de cet axe.

Dans cette nouvelle hypothèse, l'expression du moment du frottement sera

$$(6)'\ldots \quad \frac{fr\rho b}{2.\cos.\varphi}\left\{2h(H-d-c\sin.\varphi)-h(h-2d)\cos.^2\varphi-[x+c\sin.\varphi-d(1-\cos.\varphi)]^2\right\},$$

et l'équation d'équilibre se formera maintenant en

égalant la somme des momens (1)', (3)' et (4)', à la somme des momens (2)' et (6)'.

Mais, au lieu de former d'abord cette équation, soit désignée par D' la différence des momens (2)' et (6)' aux momens (1)', (3)' et (4)'. On aura, après réductions faites,

$$(7)'\ldots D' = \frac{\rho' b}{6}\left\{\begin{array}{l}[2(h-d)^3+2d^3-3frh(h-2d)]\cos.\varphi+3ch(h-2d-2fr)\sin.\varphi\\ -3h(H-d)(h-2d-2fr)\\ -[x-d+c\sin.\varphi+(d-2c)\cos.\omega]^2\\ \quad[d-x-c\sin.\varphi+2(d-2c)\cos.\varphi]\frac{1}{\cos.^2\varphi}\\ -c[12(d-c)(x-d)+(12d^2-24cd+20c^2)\cos.\varphi-8c^2\sin.\varphi]\\ -\frac{2fr}{\cos.\varphi}[x+c\sin.\varphi-d(1-\cos.\varphi)]^2.\end{array}\right\}$$

Cette équation fait voir d'abord que la différence dont il s'agit, c'est-à-dire, la résistance que la vanne oppose à son renversement en aval, diminue lorsque la hauteur H du niveau d'amont va en augmentant; effet pareil à celui qui se produit lorsque les vannes sont sans épaisseur.

Pour reconnaître ce que devient la différence D', lorsque, supposant le niveau de l'eau constant, on fait varier l'inclinaison des vannes, je prendrai le cas simple où il n'y aurait point d'eau en aval, ainsi que je l'ai fait précédemment.

Dans cette hypothèse, il faut négliger tout ce qui se trouve compris entre la parenthèse inférieure du second membre de l'équation (7)', laquelle se réduit alors à

$$(8)'\ldots D' = \frac{\rho b}{6}\left\{\begin{array}{l}[2(h-d)^3+2d^3-3frh(h-2d)]\cos.\varphi\\ +3ch(h-2d-2fr)\sin.\varphi-3h(H-d)(h-2d-2fr)\end{array}\right\};$$

ou bien à

$$(8)''\ldots \qquad D' = A \sin. \varphi + B \cos. \varphi - C,$$

en faisant

$$3ch(h - 2d - 2fr) = A,$$

$$(8)'''\ldots \qquad 2[(h-d)^3 + d^3] - 3frh(h - 2d) = B,$$

$$3h(H - d)(h - 2d - 2fr) = C.$$

Si l'on examine maintenant ce que devient la différence D' dans les variations de l'angle d'inclinaison de la vanne, et pour un niveau constant par abstraction, on verra qu'au lieu de diminuer d'abord lorsque cet angle augmente, elle va au contraire en augmentant elle-même, et qu'elle est susceptible d'un *maximum* qui correspond à l'angle dont la tangente est égale à $\frac{A}{B}$; angle indépendant, comme on voit, de la hauteur du niveau, et qui en outre sera en général fort petit, puisque l'expression A contient pour facteur la demi-épaisseur c de la vanne.

Il suit de là qu'une même valeur de la résistance D' pourra correspondre à deux inclinaisons différentes de la vanne, et que par conséquent si cette résistance est nulle pour l'angle d'inclinaison zéro, c'est-à-dire, si la vanne est en équilibre dans sa position verticale et pour un certain niveau, cet équilibre pourra se reproduire sous une autre inclinaison, en ramenant la même hauteur du niveau primitif, qu'une crue accidentelle aurait augmentée, et en offrant aux eaux un plus grand débouché que celui correspondant à la verticalité du vannage; circons-

tance curieuse, qui n'a point lieu dans le cas où les vannes sont sans épaisseur.

L'épaisseur des vannes communique donc au barrage deux modifications. La première est un ralentissement du mouvement des vannes provoqué par une crue, qui fera que si cette crue est peu considérable et n'arrive que peu à peu, les vannes paraîtront hésiter vers l'origine de leur rotation, et rester stationnaires jusqu'à ce que les eaux se soient élevées d'une certaine quantité. La seconde est de pouvoir maintenir les eaux d'une retenue à la hauteur du niveau primitif, malgré l'accident d'une crue. Malheureusement ces nouvelles propriétés sont restreintes dans des limites si étroites qu'on n'en pourra tirer aucun avantage dans la pratique.

Pour trouver ces limites, égalons à zéro l'expression de D'; on aura par-là l'équation d'équilibre du vannage incliné, laquelle équation sera

$$A \sin. \varphi + B \cos. \varphi - C = 0.$$

Cette equation donne d'abord, pour le cas du vannage vertical,

$$d = \frac{h(3H-2h)}{3(2H-h)} - fr,$$

comme lorsque les vannes n'ont point d'épaisseur; mais si on la résout par rapport à l'angle d'inclinaison des vannes, on en tirera

$$\cos. \varphi = \frac{1}{A^2+B^2}\left\{BC \pm A\sqrt{A^2+B^2-C^2}\right\},$$

qui fera connaître les deux inclinaisons sous lesquelles les vannes peuvent se mettre en équilibre

pour un même niveau, le signe supérieur du radical se rapportant à la plus petite inclinaison, et le signe inférieur à la plus grande.

Désignons par φ l'angle de plus petite inclinaison, par φ' l'angle de plus grande inclinaison, et par θ l'angle de *maximum* de résistance que, pour un niveau quelconque, le vannage oppose à son renversement en aval. Je dis qu'on aura toujours

$$\varphi' - \theta = \theta - \varphi ; \tag{12)'.}$$

c'est-à-dire que l'angle de plus grande inclinaison dépassera autant l'angle de *maximum* de résistance que celui-ci dépasse lui-même l'angle de plus petite inclinaison. En effet, posons, d'après l'équation générale d'équilibre, les deux équations

$$\cos.\varphi = \frac{1}{A^2+B^2}\left\{BC + A\sqrt{A^2+B^2-C^2}\right\},$$

$$\cos.\varphi' = \frac{1}{A^2+B^2}\left\{BC - A\sqrt{A^2+B^2-C^2}\right\}; \tag{e')...}$$

et souvenons-nous qu'on a trouvé $\text{tang.}\,\theta = \frac{A}{B}$, ce qui donne

$$\sin.^2\theta = \frac{A^2}{A^2+B^2}, \tag{e'')...}$$

$$\cos.^2\theta = \frac{B^2}{A^2+B^2}. \tag{e''')...}$$

Qu'on élimine maintenant les trois expressions A, B, C, entre les quatre équations (e), (e'), (e''), (e'''); on trouvera

$$\cos.\varphi' = \cos.\varphi\,(\cos.^2\theta - \sin.^2\theta) + 2\sin.\varphi\sin.\theta\cos.\theta,$$

qui est précisément ce qu'exprime l'équation (12)', puisque cette équation donne d'abord

$$\cos.\varphi' = \cos.(2\theta - \varphi),$$

et ensuite, d'après les formules trigonométriques,

$$\cos.\varphi' = \cos.\varphi\cos.2\theta + \sin.\varphi\sin.2\theta$$
$$= \cos.\varphi(\cos.^2\theta - \sin.^2\theta) + 2\sin.\varphi\sin.\theta\cos.\theta.$$

Si l'angle φ est zéro, c'est-à-dire, si la vanne est en équilibre dans sa position verticale, pour un certain niveau, on aura

$$\cos.\varphi' = \cos.2\theta, \quad \text{d'où l'on tire } \varphi' = 2\theta;$$

ce qui veut dire que l'angle d'inclinaison sous lequel la vanne peut se mettre une seconde fois en équilibre, en ramenant l'eau au niveau primitif, est toujours le double de l'angle correspondant au *maximum* d'effet qu'un niveau quelconque plus bas que celui-là exercerait pour faire revenir la vanne à sa position verticale.

Au-delà de cet angle d'inclinaison, la vanne ne pourra se remettre en équilibre qu'au moyen d'un abaissement du niveau primitif; et, en-deçà, elle ne pourra s'y mettre, au contraire, que pour une petite surélévation de ce niveau.

On voit, par ces résultats, que la limite des angles d'inclinaison qui ont la faculté de ramener les niveaux primitifs correspondans, n'est que le double de l'angle de *maximum* de résistance dont il a été parlé, lequel sera, dans la pratique, un angle très-petit en général.

Remarquons maintenant qu'à une inclinaison déterminée de la vanne correspondent un écoulement de l'eau, et, par conséquent, une crue de la rivière aussi déterminés, et qu'ainsi le vannage uniforme ne pourra, en s'inclinant, maintenir l'égalité de niveau de la retenue que pour une certaine crue, fixe dans chaque cas, et d'autant plus petite que les vannes seront moins épaisses. Pour des crues moindres que cette crue fixe, le vannage élevera un peu le niveau primitif, tandis qu'il l'abaissera, au contraire, pour des crues plus fortes.

La crue d'égalité de niveau sera d'ailleurs donnée, ainsi que toutes les autres, par l'équation de l'écoulement du vannage, laquelle devient, dans le cas où les vannes ont une épaisseur égale à $2c$,

$$(13)'. \quad (0{,}62)\left\{H'^{\frac{3}{2}} - \left[H' - d(1 - \cos.\varphi) - c\sin.\varphi\right]^{\frac{3}{2}}\right\}$$
$$+ (0{,}6333)\left[H' - d - (h - d)\cos.\varphi - c\sin.\varphi\right]^{\frac{3}{2}}$$
$$= (0{,}6333)\,(H - h + n)^{\frac{3}{2}}.$$

Faisons une application de ces résultats à l'exemple particulier déjà traité, dans lequel on a

$$H = 3^{m},50,$$
$$h = 3 \text{ mètres},$$
$$r = 0^{m},02,$$
$$f = \tfrac{1}{6},$$
$$H' = h = 3 \text{ mètres},$$

et pour lequel nous ferons de plus $c = 0^{m},05$.

On trouvera d'abord, par l'équation (10)',

$$d = 1^{m},121667,$$

comme lorsque les vannes sont sans épaisseur.

Calculant ensuite les formules (8)''', on trouvera, en y faisant $H = 3^{m},5$,

$$A = 8,337500,$$
$$B = 16,053750,$$
$$C = 16,053750 = B;$$

ce qui donnera, pour la tangente de l'angle de *maximum* de résistance, la quantité

$$0^{m},02102312,$$

qui correspond à $\theta = 1^{\circ}\ 12'\ 15'',7$.

On aura donc, pour l'angle sous lequel les vannes se remettraient en équilibre, après l'effet d'une crue n, et en conservant la hauteur du niveau primitif,

$$2^{\circ}\ 24'\ 31'',4.$$

Les sinus et cosinus de cet angle étant respectivement

$$0,0420277 \quad \text{et} \quad 0,999117,$$

on obtiendra, en les substituant dans l'équation (13)',

$$n = 0^{m},00676;$$

par où l'on voit que la crue qui peut, dans ce cas, conserver le niveau primitif, est comme inappréciable dans la pratique.

Passant ensuite à l'équilibre de la vanne inclinée Fig. 2,

dans l'hypothèse déjà faite, où le niveau primitif se serait abaissé de 50 centimètres, on trouvera, par l'équation (11') dans laquelle on aura substitué pour C sa valeur correspondante à $H = H' = 5^m$, qui est 12,678747, on trouvera, dis-je,

$$\cos. = 0{,}7746563 ; \quad \text{d'où } \varphi = 39^\circ\ 13'\ 34''.$$

Enfin l'équation (13)' donnera, pour la hauteur de la crue capable de produire l'équilibre et l'abaissement de niveau dont il s'agit,

$$n = 0^m{,}4681.$$

Ces derniers résultats ne diffèrent pas, comme on voit, de ceux obtenus dans la supposition des vannes sans épaisseur, d'une quantité qui soit de grande importance dans la pratique. Toutefois, puisque l'on connaît maintenant les formules qui se rapportent à l'état réel des vannes, on en pourra faire usage, si on le juge à propos.

La discussion précédente eût été plus compliquée si l'on avait considéré le cas général où les vannes sont soumises aussi à l'action de l'eau d'aval ; mais elle n'en eût pas moins conduit à des propriétés semblables, dont les limites auraient seulement un peu varié.

Je pourrais maintenant examiner ce qui arriverait si l'on donnait à la vanne des épaisseurs de plus en plus fortes, ou bien si, en la faisant d'une épaisseur ordinaire, on fixait sur son sommet un tablier qui la débordât vers le côté d'amont ; mais ce serait étendre ce mémoire sans utilité. Le lecteur trouvera dans les principes et les formules ci-dessus

établis, tout ce qui lui sera nécessaire pour procéder lui-même à cet examen. Je passe à la manière dont on pourra faire l'application du nouveau vannage au service des écluses d'une place de guerre.

Soit représentée, dans le plan, la coupe et l'élévation, par *A, A, A*, une suite de vannes suspendues par des tourillons, *a, a, a*. Ces tourillons tournent sur des crapaudines en cuivre placées dans des montans *B, B, B*, dont les retraites *i, i, i*, empêchent les vannes de s'abaisser au-dessous du plan horizontal. Le barrage sépare le fossé R d'une place forte d'un bassin d'inondation *H*, dans lequel les eaux sont maintenues à une hauteur invariable. Les vannes touchent un radier *C C C*, dont le sol, plus élevé que le niveau des eaux d'aval, n'est baigné que par celles qui s'échappent du vannage. *D D* est une cloison placée sur le radier en aval des vannes, et élevée d'une quantité plus grande que la hauteur à laquelle il faudrait porter les eaux d'aval pour renverser les vannes. Cette cloison force les eaux qui s'échappent du vannage à passer par l'ouverture *E*, qu'on peut fermer en laissant tomber la ventelle *V*. Les pieds-droits ou piles du vannage sont d'ailleurs percés de portes *C, C, C*, qui établissent une communication entre toutes les travées. Fig. 3.

Lorsqu'il s'agira de donner une chasse dans le fossé *R*, ou d'établir entre lui et le bassin une communication prompte, on laissera tomber la ventelle *V*. Les eaux, ne pouvant plus passer par l'ouverture *E*, s'éleveront rapidement entre la cloison et les vannes, qu'elles feront renverser immédiatement, à fort peu près en même temps; car on conçoit que, si, à cause

des imperfections inévitables dans la construction d'un pareil système, les vannes ne se renversaient pas toutes au même instant, le renversement de l'une ou de plusieurs d'entre elles élevant tout-à-coup les eaux en aval, au moyen des portes de communication, les autres vannes ne tarderaient pas à suivre le mouvement des premières pour prendre avec elles la position horizontale *hi*, en s'appuyant sur les retraites *i*, *i*, pratiquées dans les pieds-droits.

Malgré toute la confiance que doit inspirer une théorie fondée sur des calculs aussi positifs, on a cependant fait des expériences pour la confirmer, et pour s'assurer également si les alluvions ou les amas de gravier formés par les eaux au pied des vannes ne nuiraient pas à leur mouvement de rotation.

La vanne d'expérience a été construite de manière que les crapaudines et les tourillons mobiles pouvaient prendre entre certaines limites toutes les hauteurs possible. On l'a ainsi adaptée à un coursier de moulin, dans lequel on avait la facilité d'introduire à diverses hauteurs les eaux d'un bief supérieur. Le radier sur lequel elle reposait, pouvait à volonté être mis à sec, ou recouvert d'une certaine quantité d'eau.

Quelles qu'aient été les circonstances dans lesquelles la vanne s'est trouvée, aussitôt que les eaux passaient sur son bord supérieur, à une hauteur plus grande que celle voulue par la position des tourillons, la vanne s'est éloignée de la verticale, en donnant passage, sur le radier et vers les bajoyens, aux eaux surabondantes : elle est ensuite restée dans une position d'équilibre, tant qu'elle perdait ce qu'elle recevait.

Dans cette position, toutes les fois qu'on augmentait ou qu'on diminuait, alternativement ou simultanément, les eaux d'aval ou d'amont, la vanne s'éloignait ou se rapprochait de la verticale; elle restait au contraire immobile dans sa position inclinée, lorsque, les eaux d'amont augmentant, celles d'aval, diminuaient convenablement. Enfin, lorsque les quantités d'eau introduites dans le coursier ont été plus considérables que celles que la vanne pouvait évacuer dans une position inclinée, ou qu'elles se sont élevées en aval à une hauteur plus grande que celle requise par la position des tourillons, le renversement s'est opéré sans force et sans choc sensible, et l'eau du coursier s'est évacuée rapidement.

Dans toutes ces expériences, la vanne, après avoir donné passage aux eaux, s'est toujours relevée d'elle-même. On obtient son redressement spontané en faisant la partie inférieure aux tourillons un peu plus pesante que celle qui est au-dessus.

Comme il peut arriver qu'à l'époque des basses eaux les vannes restent quelque temps sans mouvement, il n'est pas impossible qu'il se forme à leur pied quelque dépôt de gravier qu'elles auront à écarter en commençant à tourner. Pour juger de l'obstacle que ces dépôts peuvent apporter à la manœuvre spontanée d'un vannage, on en a placé devant la vanne d'expérience, à diverses hauteurs, et même jusqu'à la hauteur des tourillons; ils n'ont produit d'autre effet que de retarder de quelques instans le mouvement de rotation, et d'exiger quelques centimètres de plus dans la hauteur de l'eau. On conçoit au surplus que, la résistance de ces dé-

pôts ne pouvant provenir que de la différence de leur poids spécifique à celui de l'eau qu'ils déplacent, l'effort à exercer par les vannes, pour les écarter, ne doit jamais être bien considérable. C'est pour éviter d'ailleurs que les grèves ne se logent entre le champ de la vanne et le radier, et n'y fassent comme des espèces de coins qui ne céderaient à aucun effort, qu'on a coupé le pied des vannes en biseau, dans une direction formant un angle de quarante-cinq degrés avec le seuil du radier lorsque la vanne est verticale, en faisant en sorte que cette dernière n'appuie sur le radier que par une surface de quelques millimètres, qu'on a soin de revêtir en fer.

Cette dernière amélioration a conduit ensuite à tailler de même en biseau les côtés verticaux de la vanne, et à les revêtir aussi en fer, ainsi que les faces des montans contre lesquelles ces côtés s'appuient, pour obtenir, par ce moyen, comme des espèces de ciseaux tranchans qui coupent, lorsque les vannes se relèvent avec force, les herbages, les roseaux et même les petites branches qui pourraient empêcher le vannage de se refermer entièrement.

N.B. Le mémoire qu'on vient de lire est un peu plus étendu que celui qu'avait présenté d'abord M. le capitaine Petitot; on y a ajouté, de concert avec l'auteur, divers développemens analytiques et mécaniques qui complètent l'explication du nouveau vannage.

V. A.

NOTICE

SUR UNE MACHINE HYDRAULIQUE

NOMMÉE *NORIA-TOURBILLON*,

inventée par M. le Chef de bataillon du génie BUREL,

et couronnée par l'Institut (1).

La noria qui fait l'objet de cette notice, est établie sur un puits circulaire de deux mètres de diamètre dans œuvre. (*Voir* les fig. 1, 2, 3 et 4, pl. IV.)

La lanterne sur laquelle se dévide la double chaîne sans fin à laquelle les seaux se trouvent attachés, est enfermée dans un châssis en forme de chape de poulie, et suspendue par la traverse supérieure de ce châssis, au moyen d'un boulon de fer bien corroyé, au milieu d'une poutre portée en l'air par deux piliers, éloignés environ de $4^{m},50$ du centre du puits. Les deux montans du châssis sont traversés par un arbre ou axe tournant horizontalement, auquel la lanterne est solidement et carrément implantée, en sorte qu'elle tourne avec l'axe.

Le puits est entouré d'une margelle en pierre de

---

(1) Cette notice est extraite d'un rapport fait à la société d'agriculture du département de l'Hérault, par M. le lieutenant-colonel du génie Paulinier de Fontenilles.

EF. Lanterne à huit fuseaux.

GG. Chaîne des seaux ou godets.

LL. Chape suspendue et tournant au-dessus du puits.

IK. Bâche suspendue à la chape.

M. Palonnier d'attache du cheval moteur.

NO. Rigole creusée dans la margelle du puits.

PQ. Roue de voiture circulant autour du puits, et donnant son double mouvement à tout le système.

SS. Siphon conduisant le liquide hors du manége.

T. Perche qu'on attache au cou du cheval pour le tenir toujours dans sa route circulaire.

Légende de la figure 5.

aa. Profil de l'axe du tourbillon.

bb. Puits de $2^{m},40$ d'ouverture.

c. Pilier central portant le bout de l'axe.

dd. Lanterne divisée en huit alvéoles, qui versent le liquide directement dans la rigole.

ef. Roue motrice.

gh. Tourillon dont le prolongement reçoit l'alonge du cheval.

Quoique la noria-tourbillon ait été spécialement inventée pour élever les eaux des salines ou des canaux d'irrigation, on a pensé qu'elle pourrait recevoir aussi des applications utiles dans les travaux d'épuisement qui accompagnent quelquefois la fondation des ouvrages de fortification.

NOTICE

SUR LE TRACÉ DE LA SPIRALE

DU PONT-LEVIS *À LA DERCHÉ*,

Par M. le Capitaine du génie GOSSELIN.

LE *mémoire* de M. Derché sur une nouvelle manœuvre de pont-levis, *inséré* au cinquième volume du *Mémorial de l'officier du génie*, laisse quelque chose à desirer sur le tracé pratique de la spirale du contre-poids. On conçoit en effet que les intersections des tangentes consécutives à une courbe quelconque ne sont autre chose que les sommets des polygones qui lui sont circonscrits, et que jamais elles ne se confondront avec la courbe, tant que les perpendiculaires à ces tangentes formeront un angle, quelque petit qu'il soit. Non-seulement la spirale approximative différera toujours de la véritable spirale, mais elle en différera d'une manière inégale : car il est aisé de voir qu'en prenant des bras de levier séparés par des angles égaux, comme l'auteur le propose, les intersections des tangentes élevées perpendiculairement à leurs extrémités s'écarteront d'autant plus de la véritable courbe que les bras de levier seront plus longs.

Ces difficultés m'ont donné l'idée de déterminer directement le point de contact de chaque tangente

avec la courbe, et pour cela de chercher la distance de ce point à l'intersection de la tangente avec le bras de levier qui lui correspond, et qui d'ailleurs est connue par l'équation d'équilibre du pont-levis.

Supposons, comme on l'a fait dans le mémoire précité, que la poulie de renvoi est située sur la verticale passant par l'axe des tourillons du tablier, à la hauteur exprimée par e, et désignons par P le poids du tablier *rapporté au point d'attache* (1), par R le rayon du treuil, par l la longueur de la chaîne extérieure dans une position quelconque du tablier, par Q le contre-poids, et par x son bras de levier. On aura, d'après les principes établis dans le cinquième numéro du *Mémorial*, l'équation

$$(A)\ldots \qquad PRl = Qex.$$

Cette équation devant subsister pour toutes les positions du tablier, elle aura lieu pour la position horizontale, en sorte qu'en désignant par L la longueur initiale de la chaîne extérieure, et par U le bras de levier initial du contre-poids, on aura aussi

$$(B)\ldots \qquad PRL = QeU.$$

Sur quoi l'on remarquera que les quantités P, L, e sont immédiatement données par l'état de la question. Quant à la quantité R, elle se détermine séparément par la condition que le treuil ne fasse qu'une

(1) P est égal au moment du poids du tablier par rapport à l'axe des tourillons, divisé par la distance de cet axe au point d'attache.

révolution pendant que le tablier passe de la position horizontale à la position verticale, condition exprimée par l'équation $2\pi R = L'$, L' désignant la longueur totale de chaîne enroulée, qui est aussi une des données de la question. Enfin, les quantités U et Q se déterminent, la première arbitrairement, et la seconde par l'équation (B) elle-même. Ordinairement on prend $U = R$.

En divisant l'équation (A) par l'équation (B), on en tire la nouvelle relation $x = \frac{U}{L}.l$, laquelle donne par la différenciation,

$$(1)\ldots \qquad dx = \frac{U}{L}.dl.$$

Désignons par φ l'arc, rapporté à l'unité de rayon, décrit par le treuil pendant que le tablier passe de la position initiale à la position quelconque que l'on considère. Si cet arc augmente d'une quantité infiniment petite $d\varphi$, la chaîne enroulée autour du treuil s'augmentera précisément de la quantité dont diminuera la chaîne extérieure ; d'où résulte l'équation

$$(2)\ldots \qquad dl = -R\,d\varphi.$$

Enfin, dans ce mouvement infiniment petit du treuil, à partir de la même position d'équilibre quelconque, il est certain que la quantité dont le contrepoids descend verticalement, devient, en dernière raison, égale au petit arc $x\,d\varphi$ que décrit autour de l'axe du treuil l'extrémité du bras de levier x ; en sorte qu'en nommant y l'abaissement du contrepoids au-dessous de l'horizontale passant par le centre du treuil, on aura

$$(3)\ldots \qquad dy = x\,d\varphi.$$

Pl. V. Considérons maintenant la spirale dans la position représentée par la figure 1, où elle se trouve amenée par le mouvement du tablier; appelons z la distance bP que nous cherchons, s la portion de spirale db qui, depuis la position initiale du système, s'est trouvée successivement en contact avec la verticale du contre-poids, et k la distance cQ du contre-poids à l'extrémité de la spirale, lorsque cette dernière est dans la position initiale. On aura évidemment $s = y - k - z$; car la quantité dont le contre-poids descend n'est autre chose que le développement de l'arc s. On aura donc aussi l'équation différentielle

$$(4)\ldots \qquad ds = dy - dz.$$

D'un autre côté, en désignant par r le rayon vecteur Ob, les triangles semblables pOb, amb donneraient, abstraction faite du signe, $ds = \frac{rdr}{z}$; mais, comme le rayon vecteur de la spirale diminue lorsque l'arc s augmente, on doit poser $ds = -\frac{rdr}{z}$; et, puisqu'on a d'ailleurs $r^2 = x^2 + z^2$, d'où $rdr = xdx + zdz$, il viendra en définitive

$$(5)\ldots \qquad ds = -\frac{xdx}{z} - dz.$$

Éliminant successivement dl, $d\varphi$, ds et dy, au moyen des équations (1), (2), (3), (4) et (5), dx disparaît aussi, et l'on obtient

$$z = \frac{RU}{L}.$$

Ce résultat exprime la propriété dont jouit la spirale, que tous les points de cette courbe sont à égale distance du pied des perpendiculaires abaissées du centre sur chaque tangente respective (1).

---

(1) La propriété de la courbe spirale à laquelle M. le capitaine Gosselin parvient ici, se déduit aussi de l'analyse employée par M. Derché pour trouver l'équation générale de ces courbes; il suffit de redresser dans cette analyse quelques erreurs de signe évidentes qui s'y sont glissées (*voyez* le 5.e numéro du *Mémorial*, note 2). On va reprendre en peu de mots cette solution, pour rectifier ces erreurs.

Réduit à son énoncé géométrique, le problème que s'était proposé M. Derché consiste à trouver la courbe pour laquelle les plus courtes distances de l'origine à chaque tangente croissent ou décroissent suivant une loi donnée.

Ces plus courtes distances, étant considérées comme les bras de levier successifs du contre-poids, doivent satisfaire à l'équation d'équilibre du pont-levis, qui exprime la loi donnée de leur accroissement ou de leur décroissement; de sorte qu'en les désignant par X, et en conservant d'ailleurs les autres notations adoptées dans la notice de M. Gosselin, on doit avoir

$$(1)\ldots \qquad X = \frac{R}{L}(L - R\varphi),$$

φ étant l'angle que les bras de levier successifs font avec l'axe des x.

D'un autre côté, ces plus courtes distances n'étant autre chose que les perpendiculaires menées de l'origine sur chaque tangente, on doit avoir à-la-fois, en désignant par p le coefficient différentiel de l'ordonnée de la spirale,

$$(2)\ldots \qquad \varphi = \text{arc tang.} = -\frac{1}{p},$$

et

$$(3)\ldots \qquad X = \frac{px - y}{\sqrt{1 + p^2}}.$$

Éliminant φ et X entre les équations (1), (2) et (3); on aura

$$(4)\ldots \qquad \frac{px + y}{\sqrt{1 + p^2}} = \frac{R}{L}\left\{L - R \text{ arc tang.} = -\frac{1}{p}\right\},$$

qui est l'équation différentielle de la courbe cherchée.

Or l'énoncé même du problème avertit que cette courbe sera

Si l'on prend, avec M. Derché, pour bras de levier initial U, une longueur égale au rayon du treuil, on aura

$$t = \frac{R^2}{L},$$

---

donnée par la solution particulière de l'équation différentielle. Différenciant donc cette dernière, par rapport à p seul, pour trouver cette solution (voyez les traités du calcul différentiel), on aura les deux équations

$$dp = 0, \tag{5}$$

$$\frac{x - py}{\sqrt{1 + p^2}} = \frac{R^2}{L}. \tag{6}$$

On tire de la première $p =$ constante $= A$, ce qui, introduit dans l'équation différentielle, donne l'intégrale complète, c'est-à-dire, l'équation de toutes les tangentes : cette équation est par conséquent

$$\frac{Ax + y}{\sqrt{1 + A^2}} = \frac{R}{L}\left\{L - R \text{ arc tang.} = -\frac{1}{A}\right\}. \tag{7}$$

Maintenant la solution particulière se trouvera, soit en différenciant l'équation (7) par rapport à la constante A, et en éliminant ensuite cette constante entre le résultat et l'intégrale complète ; soit en éliminant p entre les deux équations (4) et (6) : dans l'un et l'autre cas, on trouvera que l'équation finie de la courbe cherchée est

$$\pm\sqrt{y^2 + x^2 - \frac{R^4}{L^2}} = \frac{R}{L}\left\{L - R \text{ arc tang.} = \frac{\frac{R^4}{L^2} - y^2}{xy \pm \sqrt{y^2 + x^2 - \frac{R^4}{L^2}}}\right\}.$$

L'équation (6), appartenant à la solution particulière de l'équation différentielle, exprime nécessairement une des propriétés de la spirale. Or il est aisé de voir que cette propriété est précisément celle que M. le capitaine Gosselin nous a fait connaître; en effet, si l'on cherche la distance du contact d'une tangente en général au point où cette tangente est rencontrée par la perpen-

La distance z sera donc toujours facile à construire, puisqu'elle est simplement une troisième proportionnelle aux longueurs L et R.

Pour reproduire d'une manière très-simple tout

---

diculaire qui lui est menée de l'origine, on trouvera pour cette distance l'expression

$$\frac{s - py}{\sqrt{1 + p^2}},$$

qui n'est autre chose que le premier membre de l'équation (6). La propriété dont il est question était donc écrite dans l'analyse de M. Derché; mais on doit à M. le capitaine Gosselin d'en avoir fait apercevoir l'utilité pour la construction exacte de la spirale, et de l'avoir démontrée par des considérations directes.

Ce sujet nous amène à parler d'un autre perfectionnement proposé par M. le capitaine du génie Creully pour annuller la résistance que le poids des chaînes oppose à la manœuvre du pont-levis, et diminuer au moins de moitié l'effort que les hommes auront à exercer pour exécuter cette manœuvre.

M. Derché, n'ayant pas eu égard à l'action des chaînes du pont, proposait cependant (page 26 du *Mémorial* cité) de calculer cette action pour les quatre quarts de révolution de la spirale, et d'augmenter d'autant les bras de levier correspondans, sauf à achever la nouvelle courbe, en remplissant, au moyen de l'ancienne, les intervalles entre les quatre nouveaux points. M. le capitaine Creully va au-delà de cette idée, et remarque qu'on pourrait contre-balancer le poids des chaînes au moyen d'une courbe particulière qu'on adapterait à la manœuvre, en outre de la spirale principale; mais comme l'équation de cette nouvelle courbe serait encore assez compliquée, il pense qu'il est préférable de diviser les chaînes en plusieurs portions, et de faire équilibre séparément à chacune de ces portions par autant de petites courbes particulières. On va rapporter ce qu'il dit à ce sujet dans une notice adressée au comité conjointement avec celle de M. le capitaine Gosselin :

« Les différentes parties des chaînes servant à la manœuvre du » pont sont,

» 1.° la chaîne extérieure, qui diminue à mesure que le tablier » s'élève;

» 2.° La chaîne qui s'enroule autour du treuil, et dont les

ce qui est nécessaire à la construction de la spirale, on n'a qu'à éliminer dl entre les équations (1) et (2);

» augmentations sont égales aux diminutions de la précédente;

» 3.° La chaîne que déroule la spirale, et qui augmente quand » le tablier s'élève, mais dont le bras de levier diminue en même » temps;

» 4.° La portion de chaîne enroulée autour de la spirale, qui » diminue quand la précédente augmente, et de la même quantité.

» On ne parle pas de la portion de chaîne comprise entre la » roue de manœuvre et la poulie de renvoi, parce qu'elle ne » produit qu'une force constante dépendante de son inclinaison; » force qu'il sera toujours facile de faire entrer dans les équa- » tions d'équilibre. L'action de cette portion se réduit d'ailleurs » à une simple pression sur les axes, lorsqu'on la dispose horizon- » talement; et c'est ce qu'on supposera dans ce qui suit.

» On supposera également que la chaîne extérieure est inclinée » à 45° dans la position horizontale du tablier.

» Cela posé, si l'on conserve les notations employées dans la » notice de M. le capitaine Gosselin, et si l'on désigne par ρ le » poids d'une longueur de chaîne égale à l'unité, on aura ρl pour » celui de la chaîne extérieure, et le moment de cette chaîne » autour de l'axe du treuil sera

$$\frac{3}{4}\rho R\frac{l^2}{e}.$$

» Soit l' une certaine longueur de chaîne formant le contre- » poids, x' le bras de levier variable de ce contre-poids. L'équa- » tion $\frac{3}{4}\rho R\frac{l^2}{e} = x'\rho l'$, d'où l'on tirera

$$x' = \frac{3}{4}R\frac{l^2}{el'}, \qquad (1)$$

» servira à déterminer la courbe dont les tangentes successives » seront les directions de la verticale du contre-poids $\rho l'$ qui » fait équilibre à la chaîne extérieure. On déterminera les lon- » gueurs z' de la portion de ces tangentes comprise entre » les points de tangence et les bras de levier x', au moyen des » équations différentielles de M. le capitaine Gosselin, qui donnent, » entre x' z', et l, la relation $z' = R\frac{dx'}{dl}$, laquelle, en y

on obtient $dx = -\frac{RU}{L}\,d\varphi$, ou bien..... $dx = -\frac{R^2}{L}\,d\varphi$. En intégrant cette dernière, et

---

» substituant à la place de x' sa valeur, tirée de l'équation (1), » donne

$$z' = \frac{3}{2}\,R\,\frac{2l}{cl'}.$$

» Pour simplifier les valeurs de x' et de z', on fera $l = mR$, » m étant un nombre entier tel, qu'il en résulte un petit bras » de levier initial. Du reste, on construira la courbe par un pro- » cédé analogue à celui qu'emploie M. Gosselin pour la spirale.

» Considérons maintenant la portion de chaîne qui s'enroule » autour du treuil. A mesure que le tablier monte, elle prend » la forme d'un arc de cercle dont la longueur sera représentée » par $r\varphi$; φ désignant toujours, comme dans la notice précitée, » l'arc décrit par le treuil, rapporté à l'unité de rayon, et R dési- » gnant le rayon du treuil, augmenté, si l'on veut, de la demi- » épaisseur de la chaîne. Le moment de cette portion, par rapport » à l'axe du treuil, sera donc

$$2\rho R^2 \sin.^2 \frac{\varphi}{2};$$

» et si l'on désigne par $\rho l''$ le contre-poids destiné à lui faire » équilibre, et par x'' le bras de levier variable de ce contre-poids, » on aura pour l'équation d'équilibre

$$2\rho R^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2} = x''\,\rho l'';$$

» d'où l'on tire

$$x'' = \frac{2R^2 \sin.^2 \frac{\varphi}{2}}{l''},$$

» et partant,

$$dx'' = \frac{2R^2}{l''} \sin.\frac{\varphi}{2} \cos.\frac{\varphi}{2}.$$

» La longueur z'' de la tangente comprise entre le point de

déterminant la constante par la condition que x soit égale à R lorsque $\varphi = 0$, on trouve l'équation

$$x = R\left\{\frac{L - R\varphi}{L}\right\}, \qquad (C)$$

qui montre que pour chaque angle φ parcouru par le

» tangence et le bras de levier x'' sera donnée par l'équa-
» tion

$$z'' = \frac{R\,dx''}{dl} = \frac{R\,dx''}{-R\,d\varphi} = -\frac{dx''}{d\varphi},$$

» qui devient, en y substituant pour dx'' sa valeur ci-dessus,

$$z'' = -\frac{2R^2}{l''}\sin.\frac{\varphi}{2}\cos.\frac{\varphi}{2}.$$

» Il est aisé de reconnaître la nature de la courbe à laquelle appar-
» tiennent ces valeurs de x'' et z''. En effet, soit r'' le rayon recteur
» de cette courbe. On aura

$$r''^2 = \left(\frac{2R^2}{l''}\right)^2\left\{\left(\sin.^2\frac{\varphi}{2}\right)^2 + \sin.^2\frac{\varphi}{2}\cos.^2\frac{\varphi}{2}\right\} = \left(\frac{2R^2}{l''}\sin.\frac{\varphi}{2}\right)^2,$$

» d'où l'on tire

$$r'' = \frac{2R^2}{l''}\sin.\frac{\varphi}{2},$$

» qui est l'équation polaire d'un cercle passant par l'axe de rotation,
» et tangent au diamètre de la roue qui passe par le point d'at-
» tache de la chaîne. Le diamètre de ce cercle est $\frac{2R^2}{l''}$, et se
» réduit à $\frac{2R}{m}$, en faisant $l' = mR$, m étant un nombre entier tel
» que le bras de levier initial $\frac{2R^2}{l''}$ soit assez petit. (*Voyez* les fig. 4
» et 5.)

» On a donc, pour équilibrer la chaîne du tablier, deux courbes,
« savoir, un cercle et une spirale, qu'il sera facile d'ajouter à la
« manœuvre connue. Leur poids sera mis en équilibre dans toutes
« les positions, comme il est dit pour la spirale des contre-poids
« dans le 5.e numéro du *Mémorial*. Les deux petits contre poids
« $\rho l'$ et $\rho l''$ seront suspendus à des chaînes aussi légères que pos-
« sible, afin qu'elles n'influent point sensiblement sur l'équilibre;

bras de levier à partir de la position initiale, la longueur de ce bras de levier est une quatrième proportionnelle aux quantités L, $(L - R\varphi)$ et R.

Si donc on porte sur une ligne quelconque AH (fig. 2) la quantité AB égale à L, qu'à partir du

---

» et si les deux manœuvres ne sont point solidaires, on pourra » avoir égard à l'épaisseur de l'essieu, en disposant les deux courbes » précédentes à son extrémité, de manière qu'elles passent exac- » tement par l'axe, comme l'indiquent les figures (4) et (5). Ces » courbes, n'ayant à supporter que des poids assez petits, seront » faites en bois et pleines, afin de pouvoir être reliées facilement » entre elles et à l'essieu par des boulons. »

Quant à la chaîne que déroule la spirale, M. le capitaine Creully remarque avec raison que son effet sera nul, si, dans la position initiale du système, elle est prolongée jusqu'au fond du puits par-dessous le contre-poids, et si l'on fait entrer dans ce contre-poids toute la partie comprise entre le sol et le point de tangence, puisque cette partie est une quantité constante.

Il ne restera donc qu'à équilibrer la portion de chaîne qui se trouve enroulée sur la spirale; sur quoi M. Creully fait observer que le moment de cette portion ne surpasse pas, dans la position la plus défavorable du système et pour un bras de levier initial de 80 centimètres, le produit d'un poids de 3 kilogrammes par un bras de levier de 40 centimètres, et qu'ainsi l'on pourrait négliger cette action sans inconvénient. Cependant, si l'on veut y avoir égard, on le peut encore par un procédé pratique très-simple, qui consiste à équilibrer dans chaque position de la spirale la chaîne pendante et la chaîne enroulée, au moyen de poids successifs suspendus à la petite chaîne de la roue de manœuvre. La portion du moment de ces poids correspondante au moment de la chaîne pendante sera aisée à trouver dans chaque position, et le reste correspondra au moment de la chaîne enroulée; il ne s'agira plus que de substituer à ces dernières portions de moment les momens d'autant de portions de chaîne pendante, dont les longueurs seront par conséquent les ordonnées de la courbure que doit avoir le fond du puits dans le plan vertical de la spirale.

M. le capitaine Creully termine en faisant remarquer que, les résistances du pont-levis se réduisant, en vertu des modifications précédentes, au seul frottement, il ne sera plus nécessaire de calculer le poids du tablier pour en déduire le contre-poids; il

point B on porte de B en C une longueur égale à $L' = 2\pi R$, et qu'on divise cette longueur en n parties égales BB', $B'B''$, les distances AB, AB', AB''... &c. seront les valeurs de $L - R\varphi$, pour des arcs successivemens égaux à zéro, à la $n.^{ième}$ partie de la circonférence, à sa $2\ n.^{ième}$ partie, &c.; de sorte qu'en portant sur une ligne quelconque AD, passant par le point A, une distance Am égale à R, et en menant Bm, les parallèles $B'm'$, $B''m''$.. &c. à cette dernière ligne détermineront les bras de levier successifs Am' Am''... &c.

En prenant ensuite sur une perpendiculaire à AD la distance $AO = \zeta$, égale à la troisième proportionnelle aux longueurs L et R, ainsi qu'il est indiqué dans la figure (2), les lignes Om, Om', Om'' seront les rayons vecteurs menés du centre au point de contact des tangentes, puisqu'on a $r^2 = x^2 + \zeta^2$.

Je ferai remarquer que, dans la figure (2), on a réduit au quart chacun des termes des fractions $\frac{L - R\varphi}{L}$ et $\frac{L}{R}$, qui, multipliées par R, donnent les valeurs x et ζ; ce qui ne change nullement ces valeurs. On devra même procéder ainsi dans la pratique, afin d'éviter les trop longues dimensions.

La construction de la spirale se déduit facilement de ces résultats. Après avoir divisé une circonférence

---

suffira, dans une position quelconque du tablier, de suspendre à la chaîne de la spirale un contre-poids tel que la moindre force enlève le tablier; de diminuer ensuite ce contre-poids, jusqu'à ce que la moindre force appliquée au tablier le fasse redescendre; et enfin d'ajouter au contre-poids, ainsi diminué, la moitié du poids qu'on en aura retranché d'abord.

arbitraire (figure 2 *bis*) en n parties égales, on menera à ses points de division les rayons Ao, $A1$, $A2$, sur lesquels on portera les longueurs Am, Am', Am'', respectivement égales aux bras de levier trouvés précédemment. On élevera aux points m, m', m'', dans le même sens, des perpendiculaires constamment égales à la longueur obtenue pour z, et dont les extrémités seront les points où la courbe est tangente à ces perpendiculaires.

Si ces points devenaient trop éloignés les uns des autres pour qu'on pût exécuter le tracé d'une manière suffisamment exacte, il serait très-aisé d'en trouver d'autres, en intercalant des parallèles entre celles de la figure 2, et des rayons de division entre ceux de la circonférence (figure 2 *bis*).

On voit, par ce qui précède, que, dans la position initiale du système, l'extrémité de la spirale est abaissée au-dessous de l'horizontale des bras de levier de la quantité constante $z = \frac{R^2}{L}$.

Si, dans l'équation (C), on pose $\varphi = 2\pi$, on obtient pour le bras de levier du contre-poids, après une révolution entière, la valeur

$$x = R\left\{\frac{L - 2\pi R}{L}\right\} = R\left\{\frac{L - L'}{L}\right\},$$

dans laquelle L est généralement plus grand que L'. Ainsi le bras de levier ne devient nul que pour un arc plus grand que la circonférence donnée par l'équation $L - R\varphi = 0$, d'où $\varphi = \frac{L}{R} = \frac{L}{L'} \cdot 2\pi$.

On pourra donc, en se servant des méthodes précédentes, construire de nouveaux points de la

spirale entre le point dont le bras de levier correspond à une révolution complète et le point limite dont le bras de levier s'anéantit. On trouvera que la tangente, au dernier de ces deux points, se confond avec le rayon vecteur, qui forme alors, avec le bras de levier initial, un angle égal à $\frac{L}{L'}.2\pi - \frac{\pi}{2}$, et se réduit à la quantité constante $\zeta = \frac{R^2}{L}$, comme on le voit d'ailleurs en faisant $x = 0$ dans l'équation $r^2 = x^2 + \zeta^2$.

Si la chaîne extérieure était à 45°, on aurait $L = L' = 2\pi R$, d'où $\zeta = \frac{R^2}{2\pi R} = \frac{R}{2\pi}$; et les élémens qui servent à construire la spirale s'obtiendraient ainsi qu'il est indiqué dans la figure (3), qui n'est autre chose que la figure (2), dans laquelle on suppose $AC = 0$. Dans cette même supposition, la valeur $\varphi = \frac{L}{L'}.2\pi$, qui rend nul le bras de levier, se réduit à 2π, et la spirale prend la forme de la figure 3 *bis*, où le rayon vecteur du point limite est perpendiculaire à l'horizontale des bras de levier.

Il peut être utile de connaître la longueur totale de la chaîne du contre-poids, qui est égale au développement de la spirale pour une révolution entière, augmenté de sa longueur initiale, que déjà nous avons représentée par h.

Pour cela, reprenons l'équation (5), dans laquelle on fera $\zeta = \frac{R^2}{L}$, et par suite $d\zeta = 0$; il en résul-

tera $ds = -\frac{L}{R^2} x\,dx$. Intégrant entre les limites $x = R$ et $x = R\left(\frac{L-L'}{L}\right)$, qui déterminent une révolution complète, on obtient

$$S = \frac{L}{2} - \left(\frac{L-L'}{2L}\right)^2,$$

quantité qui, ajoutée à h, donnera la longueur de chaîne cherchée.

Dans le cas de 45°, l'expression précédente se réduit à

$$S = \frac{L}{2}.$$

La courbe que décrit le contre-poids pendant sa descension n'est pas moins remarquable, et se déduit aisément de l'analyse que j'ai suivie. En effet, si l'on élimine dl et $d\varphi$ entre les équations (1), (2) et (3), on aura l'équation

$$x\,dx = -\frac{2RU}{L}\,dy,$$

laquelle donne, par l'intégration,

$$x^2 + \frac{2RU}{L}\,y = C.$$

Cette dernière est l'équation finie d'une parabole dont l'axe est situé dans la verticale passant par le centre de la spirale, et dont le paramètre $\frac{2RU}{L}$ est indépendant des poids P et Q.

MÉMOIRE

SUR

LA THÉORIE DES PÉTARDS,

ET SES RAPPORTS AVEC CELLES DES MINES ET DES ARMES À FEU;

Par M. le Lieutenant du génie LEBLANC (J. J.)

On a proposé dans ces derniers temps de mêler à la poudre des mines une certaine proportion de sciure de bois, pour obtenir une économie dans l'emploi de cet agent, sans affaiblir son effet dynamique : les expériences qu'on a faites à ce sujet ont montré que cette pratique a quelque avantage dans certains cas; mais l'opinion des mineurs est loin d'être fixée sur les causes physiques ou mécaniques qui peuvent amener, à cet égard, tantôt de bons résultats, et tantôt des effets négatifs.

Il en est de même des vides pratiqués auprès des charges de mine, dont les effets avantageux, constatés par les premières expériences de M. le général Marescot, ne se sont pas reproduits depuis avec assez d'évidence pour obtenir une explication qui puisse faire loi dans les mines.

Nous allons émettre sur ce sujet quelques idées qui nous ont paru nouvelles, et essayer l'explica-

tion des différens effets dont il vient d'être question, en la rattachant à une théorie des pétards, fondée sur l'expérience et sur les lois mécaniques qui régissent cette matière.

Dans les armes à feu, la poudre est destinée à mettre en mouvement des projectiles en détériorant le moins possible l'enveloppe dans laquelle elle est renfermée.

Dans les mines, elle comprime les terres, les déforme, les rompt, et en projette plus ou moins les fragmens au dehors.

Dans les pétards, la poudre n'a pour but que de rompre l'enveloppe qui la contient, en la projetant le moins qu'il est possible; et cette enveloppe est en général une matière dure comme la pierre, la maçonnerie, qui ne peut se déformer sans se rompre.

Cette différence dans les résultats à produire fait qu'on ne peut pas toujours conclure par analogie d'une de ces choses à l'autre, et que ce qui augmente l'effet d'un pétard, par exemple, peut bien dans une arme à feu ne rien produire, ou être nuisible.

On sait qu'un pétard est un trou cylindrique pratiqué dans la pierre, de $0^m,03$ à $0^m,05$ de diamètre, de $0^m,30$ à $2^m,00$ de profondeur, chargé de poudre au tiers de la hauteur et bourré par dessus. Quand on met le feu par le petit conduit conservé pour cela, le gaz produit par l'inflammation de la poudre exerce sur la paroi du pétard une pression qui va en augmentant jusqu'au moment de la rupture. J'appellerai cette rupture *effet initial du gaz*, et sa tension en ce moment, *tension initiale*. La pierre fendue, le

gaz continue à presser les morceaux, les brise davantage et les projette enfin.

Ce second effet est inutile ou même nuisible dans l'exploitation ordinaire des carrières. On ferait donc du pétard l'emploi le plus avantageux possible, si, en augmentant ou en conservant la même tension initiale du gaz, on atténuait sa force après la rupture.

Pl. V. Comparons la tension initiale des gaz dans deux pétards égaux *A* et *B* (figures 6 et 7). Le premier *A* est chargé de poudre à la manière ordinaire, pendant que dans l'autre on place d'abord au fond du trou un noyau cylindrique en bois, de même hauteur que la charge du premier pétard, autour duquel noyau la poudre occupe un espace annulaire, moindre par conséquent que l'espace occupé par la charge du premier pétard.

Le feu mis à ces deux pétards, il est visible que la tension des gaz de la poudre sera la même de part et d'autre. En effet, le pétard *B* contient moins de gaz, puisqu'il contenait moins de poudre; mais il comprend aussi un moindre volume intérieur, et comme les quantités de gaz produites sont ou précisément ou du moins à très-peu près dans le même état, qu'elles sont proportionnelles aux quantités de poudre, et que les volumes qu'elles occupent sont aussi proportionnels à ces mêmes quantités, ces gaz doivent avoir précisément la même tension. Les surfaces pressées étant d'ailleurs les mêmes, il doit en résulter le même effet initial, c'est-à-dire, la même rupture. Mais après cet effet, la tension diminuant beaucoup plus rapidement dans le pétard *B* que dans le pétard *A*, où il y a plus de gaz, les éclats de pierre

seront projetés plus au loin dans celui ci que dans l'autre; et comme il est avantageux généralement d'éviter cette projection, nul doute que le pétard à noyau ne soit préférable au pétard à charge pleine.

Le noyau pouvant, d'après cette théorie, avoir un volume quelconque, il paraîtrait d'abord qu'on devrait le prendre le plus gros possible, afin d'obtenir sur la consommation de la poudre une économie d'autant plus grande; mais il faut faire attention qu'un noyau trop gros nuirait à la facile communication du feu, et causerait peut-être aussi un trop prompt refroidissement des gaz. Ce sera donc à l'expérience à faire connaître le point où il faut s'arrêter dans l'augmentation de la grosseur du noyau.

Il peut paraître extraordinaire au premier abord que deux quantités de poudre fort inégales puissent produire des effets égaux, abstraction faite des causes secondaires dont on vient de parler; mais il faut considérer qu'il ne s'agit ici que de l'action initiale des gaz, laquelle action est un effet purement statique. Les deux quantités de gaz sont à cet égard dans la même condition que celle de deux ressorts inégaux, comprimés dans des espaces différens : on conçoit en effet qu'un ressort très-court, comprimé dans un espace aussi très-petit, pourra produire une réaction égale à celle d'un grand ressort, comprimé dans un espace plus considérable ; mais aussi la moindre carrière que l'on donnera au petit ressort pour se débander, anéantira rapidement son action, tandis que celle du grand ressort sera encore considérable après le débandement virtuel, et sera capable de produire ultérieurement un effort beaucoup plus sen-

sible et plus prolongé. L'épreuve des tuyaux par la presse de Pascal présente encore un effet analogue.

D'après l'explication de l'effet du noyau *dans le pétard B*, il est évident qu'on peut substituer à ce noyau unique, d'autres cylindres plus petits, au nombre de deux, trois, quatre, &c.; et de là il est facile de pressentir le rôle de la sciure de bois, qui n'est autre que d'occuper dans la charge de poudre un certain espace, jusqu'à la proportion où *l'action* initiale de cette charge ne sera point sensiblement affaiblie.

Toute cette théorie n'est du reste que la réunion et l'explication d'expériences déjà faites. L'effet et l'emploi du noyau ont été annoncés et nous ont été confirmés depuis par un ingénieur des mines (M. Levalois). D'un autre côté l'idée d'économiser la poudre en y mêlant des corps pulvérulens étrangers, est depuis plusieurs années mise en pratique au Brésil (1), où l'on emploie pour les pétards un mélange de poudre et d'une racine jaune pulvérisée. En Allemagne, on s'est servi de sciure de bois pour le même usage, et enfin, depuis ces renseignemens, M. le directeur des fortifications de Belfort a fait faire, sur les mélanges dont il s'agit, des expériences d'après lesquelles il serait prouvé que pour les pétards de dix-huit lignes de diamètre et de trois pieds de profondeur, la charge peut être composée de volumes égaux de poudre et de sciure de bois, et qu'elle peut être réduite au volume total qu'occuperaient les dix-huit onces de poudre dont on charge

(1) *Bulletins de la société d'encouragement*, année 1818, page 71.

ordinairement ces pétards. La même proportion de poudre et de sciure paraît pouvoir être conservée pour les pétards plus petits, jusqu'à ceux d'un pouce de diamètre sur un pied de profondeur et au-dessous, pour lesquels il faudrait employer les deux tiers de la charge en poudre et remplacer l'autre tiers par un égal volume de sciure. On conçoit d'ailleurs que, la rapidité de l'inflammation croissant avec la quantité des gaz successivement produits, il faut proportionnellement plus de poudre pour les petits pétards que pour les grands.

Tous ces résultats sont consignés dans les rapports rédigés, en 1822, par M. le chef de bataillon du génie Thomassin, chargé des expériences de Belfort.

Il est évident, d'après ce qu'on vient de voir, que l'intervention des corps étrangers dans les charges de poudre ne serait d'aucune utilité pour le tir des bouches à feu. L'effet à produire ici n'est pas la rupture d'une enveloppe rigide, c'est une quantité de mouvement pour l'augmentation de laquelle on doit mettre à profit le débandement successif des gaz de la poudre, qu'il vaut mieux par conséquent, suivant la comparaison dont nous nous sommes servis, faire agir par grands ressorts que par petits ressorts. L'épreuve au surplus en a été faite pour les canons; on a essayé en France un mélange de son et de poudre qui n'a pas réussi; la même chose a été tentée en Allemagne avec de la sciure de bois, probablement avec aussi peu de succès, car on n'en parle plus.

Dans les pétards, la rupture des parois dépendant du rapport de la pression à la surface pressée, il sera avantageux de faire la chambre des poudres d'une

forme telle que la surface soit grande et le volume petit ; c'est ce que l'on obtiendra par le moyen du noyau central. Dans un canon au contraire, où il n'y a que la pression sur le boulet qui soit utile, il faut que la surface de la chambre soit la plus petite possible; on doit donc lui donner la forme d'une sphère, ou d'un cylindre assez large terminé par une demi-sphère.

Il n'était pas aussi évident que la sciure de bois ne dût pas produire un bon effet dans les charges des mines ; car s'il faut ici mettre les terres en mouvement, il faut aussi préalablement en opérer la rupture. Mais cette rupture n'est pas analogue à celle des milieux rigides où se placent les pétards : les terres, en général, par leur mollesse et la facilité qu'elles ont de se comprimer, cèdent au premier effort des gaz de la poudre ; l'effet initial n'a ici rien de subit ; c'est une action successive qui produit le refoulement du milieu et ensuite la projection des terres au dehors. Il vaut donc mieux dans ce cas faire agir la charge à la manière des grands ressorts, c'est-à-dire, avec toute la quantité de gaz possible dans un volume donné. C'est aussi ce que l'on a vu dans les expériences faites à Arras en 1822, et à Metz en 1823. L'effet des mélanges de poudre et de sciure de bois qu'on a employés dans les fourneaux de mine, a toujours paru correspondre à la quantité de poudre seulement qui entrait dans la composition de ces mélanges.

On pourrait croire que la substance étrangère agit chimiquement dans le mélange avec la poudre au moment où celle-ci s'enflamme ; le choix qu'on fait

au Brésil d'une racine particulière pour faire ce mélange, ferait supposer qu'on y a cette idée : mais ce serait une erreur, suivant toutes les analogies; car, d'une part, la sciure est ici dans un état de division trop grossier pour se joindre instantanément aux élémens de la poudre, et, de l'autre, le dosage de cette poudre est tel que tous les élémens paraissent se suffire exactement pour la formation des gaz produits, tandis qu'avec la sciure, considérée comme agent chimique, il serait hors de toutes proportions. On peut s'assurer d'ailleurs, en faisant détonner un mélange de poudre et de sciure, que cette dernière n'est point brûlée, et qu'elle est seulement noircie par le contact des gaz enflammés, qui n'ont produit sur elle, qu'un commencement de carbonisation à peine sensible.

Un grand nombre d'expériences, faites en différens lieux et à des époques différentes, ont appris qu'une certaine quantité d'air ménagée autour des poudres augmentait l'effet des pétards (1); ces expériences ont encore été répétées à l'école régimentaire du génie à Metz, en 1823. On peut voir dans les mémoires de l'école, rédigés à ce sujet (2), qu'un certain volume d'air, qu'on désigne sous le nom de *bourrage élastique*, étant ménagé au-dessus des poudres, produit une augmentation sensible dans les déblais du pétard, ou bien une économie de poudre,

(1) *Bibliothèque britannique*, tome VII, page 23; X, page 18; XI, page 29.

(2) Par M. le lieutenant du génie Roguet.

si l'on ne cherche qu'à produire le même effet. On a trouvé que deux pétards *A* et *C* (figures 6 et 8), dont le premier est à charge ordinaire, tandis que le second ne contient que le tiers de cette charge, surmonté d'un volume d'air double de celui qu'occupe la poudre, produisaient sensiblement le même déblai, quoique l'explosion de ces deux mines présentât d'ailleurs des phénomènes différens. Ainsi l'amorce du pétard *C* ne fusait pas, et l'on remarquait un intervalle de temps très-sensible entre le trait de lumière et l'instant de l'explosion. Il n'y avait pas de pierres lancées, mais les dimensions des blocs brisés étaient plus considérables, sur-tout à la profondeur de la charge.

Plusieurs mineurs ont cherché à expliquer cet effet des espaces d'air par l'action chimique de l'oxigène de l'air; nous essaierons plus tard de combattre cette opinion, parce qu'on s'en est appuyé très-récemment encore (1). Pour le moment, nous transcrirons l'explication donnée d'après Euler de la rupture d'une arme à feu, lorsqu'on laisse un certain espace libre entre la charge et le projectile (2).

Cette expérience est tout-à-fait analogue à celle des pétards.

« La lenteur bien prouvée de la combustion de la poudre, comparativement à l'instantanéité qu'on

(1) *Projet d'expériences*, par le chef de bataillon Ferrogio; Bastia, 1821.

(2) *Bibliothèque britannique*, tome XI, page 22, note du traducteur. *Principes d'artillerie* de Robins, traduction de Lombard, note d'Euler, page 160.

» *lui* supposait, explique pourquoi la même charge » que supporte très-bien une arme donnée lorsque » la balle repose sur la poudre, la fait souvent cre- » ver, lorsque cette balle laisse un intervalle vide » au-dessous d'elle : c'est que, dans le premier cas, » l'inflammation étant progressive, les premières » portions du fluide élastique dégagé mettent le » projectile en mouvement et agrandissent succes- » sivement l'espace dans lequel se développe le » même fluide, à mesure que la combustion s'opère ; » en sorte que sa tension n'arrive jamais à un très- » haut terme ; au lieu que dans le cas où il y a de » l'intervalle entre le projectile et la charge, celle-ci » a le temps de s'enflammer en entier et de donner » tout son fluide avant que l'inertie du projectile soit » vaincue et qu'il se soit mis en mouvement. Celui- » ci ne cède pas d'abord avec une vîtesse propor- » tionnée à la violente pression qu'il reçoit ; d'où il » résulte de la part du fluide une brusque et vio- » lente réaction, qui la fait crever quelquefois. »

Cette explication cadre tellement avec toutes les circonstances de la détonation des pétards, qu'elle se présente naturellement à ceux qui les ont observées sans être imbus du préjugé que l'air est utile à la combustion de la poudre. Elle explique l'intervalle qui sépare l'instant de la détonation d'avec celui où le feu est mis à la poudre : l'amorce ne fuse pas, parce que les premiers gaz développés se répandent dans l'espace plein d'air, et que la détonation est ensuite trop prompte pour que le gaz s'échappe par le trou d'amorce.

Les morceaux brisés sont plus gros parce que

l'action initiale, quoique aussi grande que dans le cas d'une charge complète, en vertu de la réaction causée par l'espace d'air, s'amortit plus promptement, puisqu'il y a moins de gaz, et n'exerce ensuite dans les premières fissures du milieu qu'un effort dilaniateur infiniment moindre.

Quoique la poudre avec l'air produise un plus grand effet dans un pétard, on ne doit pas en conclure qu'on pourrait diminuer le bourrage ; car si celui-ci vient à céder, l'augmentation de volume affaiblit la réaction et la tension du gaz, qui sort dans ce cas sans briser la pierre. C'est aussi ce qui résulte des épreuves de l'école de Metz. On ne peut diminuer ou supprimer les bourrages que dans les fourneaux surchargés, où l'augmentation de volume diminue peu la pression, à cause de l'énorme quantité de gaz.

Cet effet des vides dans les pétards est depuis long-temps mis à profit dans l'exploitation des mines. Le procédé connu sous le nom de *méthode du tasseau en dessous*, rapporté des mines de Norwége par M. Hausmann, et mis en pratique aux mines du Hartz en 1807, est absolument fondé sur cette propriété du vide d'augmenter la puissance de la charge (1).

Guidés par la théorie que nous venons d'exposer, si nous examinons l'effet que produirait un vide laissé auprès d'un fourneau de mine, nous verrons que cet effet doit être beaucoup moindre, parce que les

(1) *Richesse minérale*, par M. Héron de Villefosse, tom. II, pag. 104 et 105.

terres cèdent ici successivement à l'effort des gaz en se comprimant; ce qui prévient la violence de la réaction initiale, et affaiblit aussi l'action ultérieure.

En général, les vides ménagés auprès des fourneaux de mine seront moins efficaces dans les milieux compressibles que dans les milieux rigides, et leur effet aura dans tous les cas une limite que l'expérience devra faire connaître; car s'il est vrai qu'en donnant ainsi aux gaz de la poudre le temps de se former entièrement on augmente l'effet intérieur, d'un autre côté l'espace vide dans lequel les gaz se dilatent avant d'agir affaiblit leur tension initiale: et retarde aussi l'instant de leur action, ce qui serait à considérer vu que la déperdition rapide du calorique altère extraordinairement la force de ces gaz.

On déduit aussi de ces principes que si, dans une mine, le vide est placé sur la ligne de moindre résistance, son effet sera d'augmenter l'action dans le sens latéral, et de l'affaiblir au contraire dans le sens de la projection des terres; conséquences qui sont, jusqu'à un certain point, confirmées par les expériences que M. le général Marescot fit à Mayence en 1800 (1). Dans ces expériences, les fourneaux avaient tous une ligne de moindre résistance de 10 pieds; ils étaient chargés de 100 livres de poudre chacun et bourrés de la même manière. Les résultats montrent, abstraction faite de ceux des fourneaux *O* et *H*, que l'auteur cite lui-même comme des anomalies

(1) *Mémorial de l'Officier du génie*, tome I.er, page 27.

dont il indique la cause, que les chambres des poudres croissant de 1 pied 1/4 jusqu'à 4 pieds de côté, les diamètres des entonnoirs ont augmenté de 23 à 29 pieds; que les commotions se sont fait sentir de plus en plus loin; mais que la hauteur des gerbes a décru de 30 pieds à 8 pieds. Et lorsqu'on a porté les chambres à 6 pieds de côté, on a vu décroître la largeur des entonnoirs, qui n'ont presque plus été évidés, parce qu'alors, sans doute, on avait dépassé, pour ce cas, la limite de l'étendue efficace des espaces d'air.

Nous avons ci-dessus rejeté l'action de l'oxigène de l'air comme agent chimique dans l'inflammation de la poudre; telle est en effet l'opinion des physiciens et des chimistes. A l'école polytechnique, on faisait détoner une petite portion de poudre, en chauffant un tube courbe (figure 9), qui ne contenait que de la poudre et du mercure. M. Gay-Lussac nous a d'ailleurs assuré qu'il avait fait à ce sujet mainte et mainte expérience, et qu'il s'était convaincu que l'air ne pouvait agir chimiquement dans la détonation de la poudre, en sorte que s'il paraissait avoir une action dans certaines circonstances, il fallait chercher à cette action une cause mécanique, et il adoptait l'explication donnée plus haut d'après Euler.

Mais si les expériences modernes infirment absolument la coopération chimique de l'air dans le phénomène de l'inflammation de la poudre, d'autres expériences faites anciennement, et souvent alléguées depuis, semblent au contraire prouver cette participation; il convient donc de les examiner. Les

plus concluantes sont sans contredit celles faites par Dantony (1). Voici la première :

Sous un récipient *R* (figure 10), on place de la poudre en *P*, sous un appareil disposé de manière à pouvoir y mettre le feu extérieurement au moyen d'un fer rouge *F*, qui échauffe la paroi mince sur laquelle est la poudre. Quant le récipient est plein d'air et qu'on fait détoner la poudre, elle brûle entièrement ; mais si avant on a fait le vide, la poudre est plus lente à s'enflammer ; une petite portion seulement brûle ; le reste, lancé sous le récipient, se trouve intact après la détonation ; et même, quand le vide est fait parfaitement, la poudre se liquéfie avant de s'allumer ; après quelques ébullitions, elle brûle tout d'un coup et se détruit en environnant de sa flamme la poudre contiguë posée sur l'anneau : celle-ci ne se liquéfie point pour cela ; elle reste intacte en partie sur la platine où elle a été poussée par la flamme.

Cette expérience a pu faire illusion à Dantony, qui, sans bien connaître les propriétés des gaz, savait que l'air était nécessaire à la combustion ordinaire des corps ; sans cela il aurait répété son expérience dans de l'acide carbonique ou dans un gaz qui ne contient pas d'oxigène, et aurait été conduit à rejeter l'action chimique de l'air. On explique d'ailleurs son expérience en remarquant que dans le cas du vide les premières portions de gaz développé se dilatent avec plus de vîtesse, parce qu'elles n'éprou-

(1) *Examen de la poudre*, page 29, traduction de M. le vicomte de Flavigny, édition de 1773.

vent pas de résistance et projettent au loin les grains de poudre, qui n'ont pas le temps de s'enflammer.

Dans la seconde expérience (fig. 11), Dantony place, dans un tuyau de bronze C, 24 grains de poudre en P. Comme la poudre ne remplit pas tout l'espace annulaire, cet espace est diminué au moyen des anneaux G. Il lie ensuite un morceau de vessie en DD, et il visse la partie NN à un récipient VV. La tige LM est destinée à mettre le feu par le canal AHJ : elle est conique pour le boucher exactement. Quand le récipient est plein d'air et qu'on met le feu, la vessie crève et toute la poudre brûle ; mais si l'on fait le vide dans le récipient, une grande partie de la poudre y est projetée sans avoir été brûlée, quoique toute la capacité P soit bronzée par la flamme, et que la poudre en P ait dû passer au travers ; et quelques grains de poudre paraissent avoir éprouvé un commencement de combustion. Si au lieu de mettre la vessie en D, on la met en OO, et qu'on diminue le trou RR au moyen de tampons, il y aura d'autant plus de poudre brûlée que ce trou sera plus petit, et elle brûlera entièrement quand il sera égal au trou J.

Il est facile de concevoir que ces expériences ont pu tromper Dantony ; cependant elles s'expliquent encore comme la précédente. Dans le cas du vide, la vessie, déjà fortement pressée, cède au premier effort de la poudre : le gaz est aussitôt soutiré dans le récipient ; il n'a pas le temps d'allumer la poudre ; la paroi P, qui est froide, fait précipiter un peu de sulfure de potassium qui paraît l'avoir bronzée. Le gaz abandonne, dans la rapidité de sa projection, les

grains de poudre allumés, ce qui en arrête la combustion.

On sait en effet (voyez *Bibliothèque britannique*, tome XI, *expérience de Rumfort*) qu'un petit morceau de poudre allumé, lancé avec une grande vîtesse dans l'air, s'y éteint : on est assuré qu'il a brûlé, puisqu'on l'a vu enflammé, qu'il a allumé des écrans de papier à travers lesquels il a passé, et qu'on remarque sur lui des traces d'un commencement de déflagration ; mais comme il est lancé avec beaucoup de vîtesse et qu'il éprouve moins de résistance que les gaz qu'il dégage, ceux-ci restent en arrière et la déflagration s'arrête. Ici c'est l'inverse, les gaz se précipitent dans le récipient et abandonnent les grains dont la déflagration peut être déjà commencée. En diminuant *OO*, le gaz ne peut plus s'échapper assez rapidement, et toute la poudre brûle.

Mais ce qui complétera la preuve de l'inutilité de l'air dans le phénomène de la combustion de la poudre, ce sera de montrer que les produits de cette combustion sont, dans leur variété même, une combinaison atomique résultant du dosage de la poudre. M. Gay-Lussac l'avait annoncé depuis long-temps, et M. Brianchon (1), en appliquant à cette question la théorie des nombres proportionnels, a donné à cette opinion un air d'évidence et de simplicité qu'une fausse hypothèse a bien rarement.

(1) *Journal de chimie*, septembre 1822.

NOTE

SUR LES DIVERSES FORMULES PROPOSÉES POUR DÉTERMINER LES CHARGES DES FOURNEAUX DE MINES;

Par M. le Chef de bataillon du génie AUDOY.

La détermination des effets de la poudre dans les mines est un des problèmes physico-mécaniques les plus difficiles à résoudre. Si l'inflammation de la poudre était instantanée, et si les milieux où se placent les mines étaient homogènes, ce problème consisterait,

1.° A trouver l'action des fluides dégagés de la poudre contre les parois de la capacité qui les contient et qui leur résiste;

2.° A trouver ensuite les effets de cette action sur une masse élastique compressible et pesante, soit que cette masse doive céder également de tous côtés sans s'ouvrir, soit qu'elle doive s'ouvrir vers un vide ou un milieu moins dense déterminés.

Pour résoudre ces deux questions, on voit qu'il faudrait d'abord avoir constaté, par des expériences, quelles sont la nature et les proportions des gaz et des vapeurs qui se développent par l'inflammation pour chaque quantité de poudre donnée; quel est

le degré de chaleur qui, dans chaque circonstance, résulte de cette inflammation; quelle est la loi de la dilatation des gaz et des vapeurs dans les très-hautes températures; quelle est la loi de leur force élastique; quel est enfin le mode de résistance des milieux compressibles aux gaz qui tendent à-la-fois à les pousser et à les pénétrer: toutes questions qui n'ont été examinées jusqu'ici que dans des limites de température et de compression bien inférieures à celles de la poudre enflammée.

Les trois principaux agens dynamiques de la poudre paraissent être le gaz acide carbonique résultant de la combinaison du charbon avec l'oxigène de l'acide nitrique et de la potasse, le gaz azote rendu libre par suite de cette combinaison, et le sulfure de potassium, gazéfié par la chaleur et résultant de l'union du soufre avec le métal de la potasse. Cependant on ne sait pas encore s'il ne se produit pas d'autres fluides au moment de la plus forte chaleur; si, par exemple, il ne se forme pas de l'eau dont la vapeur, violemment dilatée, ajouterait une grande force à celle des gaz, ainsi que l'ont pensé Rumfort et quelques autres physiciens.

D'un autre côté, les propriétés dynamiques des fluides dégagés de la poudre paraissent s'altérer et s'affaiblir avec une grande rapidité, pendant que la non-instantanéité de l'inflammation modifie d'une manière incertaine l'effet initial de ces fluides, auquel l'effet final se trouve subordonné: toutes ces circonstances, en se combinant, compliquent la question à tel point qu'il sera peut-être toujours impossible de la résoudre d'une manière satisfaisante, et c'est ce qui

explique les différences si extraordinaires qui existent entre les évaluations qu'on a faites jusqu'à ce jour de la force de la poudre enflammée. Robins, par exemple, a prétendu prouver que cette force équivalait à celle de 1,000 atmosphères; Daniel Bernouilly l'a portée à 10,000 atmosphères; les formules d'Euler la supposeraient de 5,000; et enfin d'après Rumfort elle serait de plus de 55,000 atmosphères.

Quoi qu'il en soit de cette force, on conçoit qu'à l'instant de l'inflammation d'une mine, le choc des gaz subitement développés agrandit tout autour de la charge un espace sphérique un peu surbaissé, en refoulant et comprimant les terres sur elles-mêmes jusqu'à une certaine distance. Cet effet rapide est ce qu'on peut appeler l'action initiale de la charge dans un terrain compressible; il est le résultat d'une réaction des gaz, provenant de ce que le terrain situé vers la ligne de moindre résistance ne peut entrer en mouvement et être chassé avec une vîtesse comparable à celle du fluide dégagé. Après avoir été comprimé, la pression des gaz signale bientôt le côté faible du terrain; la sphère creuse se soulève de ce côté et se crevasse en même temps autour du centre d'exhaussement; le gaz se lance dans ces crevasses, les agrandit, pénètre dans les terres plus avancées, qu'il chasse enfin au dehors, en évasant les parois de l'excavation par son expansion graduelle.

Voilà l'énoncé général des circonstances qui accompagnent l'explosion d'un fourneau de mine; mais l'état de nos connaissances sur le phénomène de l'inflammation de la poudre et sur le mode de résistance des milieux solides à l'action des gaz, ne

permet pas de calculer *à priori* les nombreuses modifications de l'effet produit. On a fait beaucoup de recherches sur la forme de l'entonnoir, par exemple; cependant il est sensible que cette forme ne doit pas être toujours la même, et qu'elle dépend du rapport entre la force impulsive du fluide de la poudre et le mode de résistance du milieu. Si la charge du fourneau n'est pas excessive par rapport à la ligne de moindre résistance, et que le terrain soit d'une consistance ferme, l'effet initial de l'explosion sera bien distinct de l'effet final, et restera marqué dans ce dernier; alors l'entonnoir présentera la forme d'une calotte sphérique coupée par une autre surface de révolution: mais si la charge est très-grande par rapport à la profondeur du fourneau, la répercussion de gaz sera proportionnellement moins considérable; l'effet final se confondra avec l'effet initial pour altérer plus ou moins la forme sphérique qu'aurait eue le fond du fourneau.

Quant au calcul des charges, on aperçoit la difficulté de faire entrer en ligne de compte toutes les circonstances modifiantes : tout ce que la pratique des mines a pu se promettre jusqu'ici, a été de trouver des formules empiriques, basées sur des hypothèses plus ou moins plausibles, et conduisant seulement par une compensation approchée des erreurs, à des évaluations à peu près d'accord avec les données de l'expérience.

Telles sont en effet toutes les formules des charges de mine connues jusqu'à ce jour. Si quelques ingénieurs ou mineurs se sont flattés d'avoir établi ces formules sur les lois physiques et mécaniques qui

régissent cette question, on voit que leur prétention est entièrement vaine.

Mais toutes les formules qu'on a proposées n'ont pas un égal degré d'utilité. L'objet de cette note est de faire apprécier leur convenance relative : pour cela on rapportera celles de ces formules qui ont plus particulièrement fixé l'attention des mineurs, et l'on en fera ensuite la comparaison. Quoique ce rapprochement ait été fait partiellement par plusieurs mineurs, et notamment par M. Lebrun, dont les mémoires manuscrits ont enrichi l'art des mines de beaucoup de données précieuses, on croit utile de le reproduire ici d'une manière plus générale, et de réunir sous les yeux des officiers du génie, les principaux documens relatifs à la charge des fourneaux, afin de préciser l'état peu avancé de la science à cet égard.

Formule et règle des Mineurs.

La plus ancienne loi connue est celle qui, pour les fourneaux à entonnoirs semblables, fait les charges proportionnelles aux cubes des lignes homologues menées dans ces entonnoirs, telles que les rayons d'entonnoir, les lignes de moindre résistance, les rayons d'explosion, &c. Cette loi a été essayée pour divers terrains, et l'expérience l'a toujours à peu près confirmée : je la désignerai sous le nom d'*ancienne loi des mineurs*.

De cette loi dérivait, pour la formation des entonnoirs ordinaires dans les terres communes, ce qu'on appelait *la règle des mineurs*, qui consistait à cuber la ligne de moindre résistance exprimée en

pieds, à retrancher le dernier chiffre à droite du résultat, et à prendre le reste pour le nombre de livres de poudre dont la charge devait se composer. En effet, l'expérience ayant constaté que pour produire dans les terres communes un entonnoir ordinaire sous 6 pieds de ligne de moindre résistance, il faut 22 livres de poudre, en désignant par C la charge d'un fourneau ordinaire quelconque, et par H sa ligne de moindre résistance, on avait la proportion $22 : C :: (6)^3 : H^3$, d'où l'on tirait

$$C = \frac{22}{(6)^3} H^3 = \frac{11}{108} H^3 ;$$

et comme le rapport $\frac{11}{108}$ diffère fort peu d'un dixième, il s'ensuivait la règle en question.

Cette règle, ou plus exactement la proportion d'où elle est tirée, rapportée aux nouvelles mesures, donne la formule $C = (1,454)\, H^3$.

Si l'on suppose, ce qui est suffisamment exact pour la pratique, que l'entonnoir est un cône tronqué, dont la petite base a pour rayon la moitié du rayon de la grande base, ou de la ligne de moindre résistance, la solidité de cet entonnoir sera égale à $\frac{11}{6} H^3$; et comme la proportion des cubes des lignes de moindre résistance est aussi celle des solidités des entonnoirs, en nommant φ la quantité de poudre qui correspond à un mètre cube de terre dans le jeu du fourneau ordinaire, $\frac{11}{6} \varphi$ sera la charge du fourneau dont la ligne de moindre résistance sera 1 mètre. On aura donc aussi la proportion $C : \frac{11}{6} \varphi :: H^3 : 1$,

ce qui donne $C = \frac{11}{6} \varphi H^3$, formule applicable à tous les terrains pour lesquels φ sera connu.

Mais lorsque les entonnoirs ne sont pas semblables, la loi des mineurs ne se vérifie plus, et l'on en a cherché d'autres. On désignera, dans la discussion de ces lois, par C, H, T, R, la charge cherchée d'un fourneau, sa ligne de moindre résistance, son rayon d'entonnoir, et son rayon d'explosion; par C ou C'' la charge du fourneau d'épreuve, suivant que ce fourneau est un fourneau ordinaire ou non; par h, t, r, la ligne de moindre résistance, le rayon d'entonnoir et le rayon d'explosion de ce fourneau d'épreuve. On représentera en outre le rapport du rayon de l'entonnoir à la ligne de moindre résistance, par n pour le fourneau proposé, et par p pour le fourneau d'épreuve; en sorte qu'on ait $T = nH$, $t = ph$.

Loi de Bélidor.

Bélidor a supposé que les charges de deux fourneaux quelconques doivent être entre elles comme les cubes des rayons d'explosion. La formule qui dérive de cette loi est donc $C = \frac{C'' R^3}{r^3}$; ou bien, en remplaçant les rayons d'explosion par les lignes de moindre résistance (*),

$$C = \frac{C' H^3}{h^3} \left\{ \frac{1 + n^2}{1 + p^2} \right\}^{\frac{3}{2}}.$$

(*) La ligne de moindre résistance, le rayon d'entonnoir et le rayon d'explosion formant un triangle rectangle, on pourra toujours, au moyen des équations $T = nH$, $t = ph$, remplacer deux de ces lignes par la troisième.

Si l'on suppose que le fourneau d'épreuve est un fourneau ordinaire, de même ligne de moindre résistance que le fourneau proposé, on a $C' = C$, $p = 1$, et la formule devient $C = C \left\{ \frac{1+n^2}{2} \right\}^{\frac{3}{2}}$, qui est la même que $C = C \frac{R^3}{r^3}$.

Mais, l'expérience ayant prouvé que les charges doivent croître plus rapidement que les cubes des rayons d'explosion lorsque la ligne de moindre résistance reste la même, il s'ensuit que la formule de Bélidor, exacte pour le cas des entonnoirs semblables, donnera pour la plupart des autres fourneaux des charges trop faibles, et d'autant plus faibles que les entonnoirs devront être plus évasés.

Bélidor avait encore proposé pour les fourneaux surchargés à rayon triple de la ligne de moindre résistance, une autre règle qui consistait à composer la charge d'autant de fois 300 livres de poudre que la ligne de moindre résistance contenait de pieds dans sa longueur. Mais cette règle, supposant les charges en raison des lignes de moindre résistance, ne peut être regardée que comme une distraction de son auteur.

Loi de Muller.

Muller, qui, du temps de Bélidor, était professeur à l'école de Woolwichen Angleterre, a laissé des écrits sur les mines, dans lesquels il établit que les charges doivent être comme les expressions des solides d'entonnoirs qu'elles enlèvent, ces solides étant supposés des paraboloïdes tronqués par un plan passant au

ce qui donne $C = \frac{11}{6} \varphi H^3$, formule applicable à tous les terrains pour lesquels φ sera connu.

Mais lorsque les entonnoirs ne sont pas semblables, la loi des mineurs ne se vérifie plus, et l'on en a cherché d'autres. On désignera, dans la discussion de ces lois, par C, H, T, R, la charge cherchée d'un fourneau, sa ligne de moindre résistance, son rayon d'entonnoir, et son rayon d'explosion; par C ou C'' la charge du fourneau d'épreuve, suivant que ce fourneau est un fourneau ordinaire ou non; par h, t, r, la ligne de moindre résistance, le rayon d'entonnoir et le rayon d'explosion de ce fourneau d'épreuve. On représentera en outre le rapport du rayon de l'entonnoir à la ligne de moindre résistance, par n pour le fourneau proposé, et par p pour le fourneau d'épreuve; en sorte qu'on ait $T = nH$, $t = ph$.

Loi de Bélidor.

Bélidor a supposé que les charges de deux fourneaux quelconques doivent être entre elles comme les cubes des rayons d'explosion. La formule qui dérive de cette loi est donc $C = \frac{C'' R^3}{r^3}$; ou bien, en remplaçant les rayons d'explosion par les lignes de moindre résistance (*),

$$C = \frac{C'' H^3}{h^3} \left\{ \frac{1 + n^2}{1 + p^2} \right\}^{\frac{3}{2}}.$$

(*) La ligne de moindre résistance, le rayon d'entonnoir et le rayon d'explosion formant un triangle rectangle, on pourra toujours, au moyen des équations $T = nH$, $t = ph$, remplacer deux de ces lignes par la troisième.

Si l'on suppose que le fourneau d'épreuve est un fourneau ordinaire, de même ligne de moindre résistance que le fourneau proposé, on a $C' = C$, $p = 1$, et la formule devient $C = C \left\{ \frac{1+n^2}{2} \right\}^{\frac{3}{2}}$, qui est la même que $C = C \frac{R^3}{r^3}$.

Mais, l'expérience ayant prouvé que les charges doivent croître plus rapidement que les cubes des rayons d'explosion lorsque la ligne de moindre résistance reste la même, il s'ensuit que la formule de Bélidor, exacte pour le cas des entonnoirs semblables, donnera pour la plupart des autres fourneaux des charges trop faibles, et d'autant plus faibles que les entonnoirs devront être plus évasés.

Bélidor avait encore proposé pour les fourneaux surchargés à rayon triple de la ligne de moindre résistance, une autre règle qui consistait à composer la charge d'autant de fois 300 livres de poudre que la ligne de moindre résistance contenait de pieds dans sa longueur. Mais cette règle, supposant les charges en raison des lignes de moindre résistance, ne peut être regardée que comme une distraction de son auteur.

Loi de Muller.

Muller, qui, du temps de Bélidor, était professeur à l'école de Woolwich en Angleterre, a laissé des écrits sur les mines, dans lesquels il établit que les charges doivent être comme les expressions des solides d'entonnoirs qu'elles enlèvent, ces solides étant supposés des paraboloïdes tronqués par un plan passant au

foyer, perpendiculairement à l'axe de l'entonnoir. La formule résultant de cette loi sera donc

$$C' = C'' \frac{R^3}{r^3} \left\{ \frac{\sqrt{n^2+1}-1}{\sqrt{p^2+1}-1} \right\} \left\{ \frac{1+p^2}{1+n^2} \right\};$$

ou bien $C' = C \frac{[\sqrt{n^2+1}-1]\sqrt{n^2+1}}{\sqrt{2}(\sqrt{2}-1)}$, si l'on suppose que le fourneau d'épreuve est un fourneau ordinaire de même ligne de moindre résistance que le fourneau proposé.

La première de ces formules rentre dans celle de Bélidor pour le cas des entonnoirs semblables, puisqu'alors on a $n = p$: elle sera donc exacte dans les mêmes circonstances que celles de Bélidor; mais, comme cette dernière, elle restera inexacte pour les entonnoirs dissemblables, parce que l'expérience prouve que les charges des fourneaux correspondans ne sont pas dans les rapports des solides des entonnoirs, quelle que soit la figure de ces derniers.

Vallière faisait aussi les charges proportionnelles aux solides des entonnoirs, qu'il supposait être des paraboloïdes ayant leur foyer au centre des poudres: cette loi étant analogue à celle de Muller, on n'en parlera pas davantage (*).

Loi de Mouzé.

Mouzé admet que les charges sont entre elles comme les carrés des rayons des entonnoirs, lorsque

(*) La solidité du paraboloïde tronqué de Muller est plus petite que celle du paraboloïde de Vallière; mais Muller ajoutait quelque chose à cette solidité, et sa table est la même que celle de Vallière.

les lignes de moindre résistance sont les mêmes : sa formule est donc

$$C = C'' \frac{T^2}{t^2},$$

ou bien $C = C'' \frac{n^2 H^2}{p^2 h^2} = C'' \frac{n^2}{p^2}$,

puisque, par hypothèse, H est égale à h. Si le fourneau d'épreuve est ordinaire, on a $C' = Cn^2$.

Ces formules sont défectueuses en ce qu'elles deviennent identiques pour le cas des entonnoirs semblables. Elles donnent d'ailleurs, dans les autres cas, des charges beaucoup trop faibles, puisqu'elles supposent que ces charges sont comme les solidités des cônes ayant le sommet au centre des poudres, et pour bases les cercles des entonnoirs, chose qui est *à fortiori* démentie par les expériences.

De cette loi de Mouzé en découle une autre plus générale, qui est que les charges sont entre elles comme les carrés des rayons d'entonnoirs par les lignes de moindre résistance : en effet puisqu'on a $C' = C_1 \frac{T^2}{t'^2}$, t' étant le rayon d'entonnoir du fourneau ordinaire dont la charge est C_1, on aura pour un autre fourneau proposé $C'' = C_n \frac{t''^2}{t'^2}$; mais, par la loi des mineurs, on a $C_1 = C_n \frac{t'^3}{t'^3}$; il viendra donc la proportion $C' : C'' :: T^2 t' : t''^2 t''$; et comme les rayons t', t'', sont aussi les lignes de moindre résistance des fourneaux dont les charges sont C' et C'', on aura

$$C' : C'' :: T^2 H : t^2 h,$$

qui exprime la loi énoncée. On tire de cette loi la

laquelle rentre dans celle des mineurs pour *le cas* des entonnoirs semblables produits dans un même terrain.

Si l'on suppose que le fourneau d'épreuve est un fourneau ordinaire de même ligne de moindre résistance que le fourneau proposé, et que les milieux sont les mêmes, la formule deviendra

$$C = Cn^2 \sqrt{\frac{n^2+1}{2}}.$$

La formule générale de M. le général Marescot diffère des formules précédentes en ce qu'*elle donne* la charge d'un fourneau placé dans un terrain quelconque au moyen de celle d'un autre fourneau qu'on aurait fait jouer dans tout autre terrain, tandis que les formules précédentes supposent un même terrain pour les fourneaux comparés.

Méthode de MM. Gumpertz et Lebrun.

On n'a pas, à l'égard de cette méthode, que M. Dobenheim a traduite en formule, *expliqué* jusqu'ici d'une manière nette l'hypothèse sur laquelle elle repose. Voici ce qu'il semble qu'on peut dire de plus exact sur ce sujet.

Si, dans un certain terrain, et sous une même ligne de moindre résistance t, on fait jouer deux charges de poudre successives C et C', dont la première donne l'entonnoir du fourneau ordinaire, et l'autre l'entonnoir du fourneau surchargé, la différence des rayons de ces deux entonnoirs aura une certaine valeur dépendante de la différence des deux charges. Si maintenant on fait jouer la

charge C' en fourneau ordinaire, d'après la règle connue pour cela des mineurs, on obtiendra un second entonnoir de fourneau ordinaire et la différence de son rayon à celui du premier aura de même une certaine valeur dépendante aussi de la différence des charges C' et C.

Le principe de la méthode dont il s'agit consiste à supposer que le rapport des deux différences de rayons dont on vient de parler, et qui résultent l'une et l'autre d'une même augmentation de la charge C, est une quantité constante pour tous les terrains et pour toutes les lignes de moindre résistance possibles, en sorte qu'en nommant T' le rayon d'entonnoir du fourneau surchargé provenant de la charge C', t' le rayon d'entonnoir ordinaire provenant de la même charge, convenablement placée pour cela, et K une constante, on aura

$$\frac{T'-t}{t'-t} = K;$$

ou bien $\frac{t(n-1)}{t'-t} = K$, en faisant $T' = nt$.

Admettant cette équation comme hypothèse fondamentale de la méthode, on en tire

$$\frac{t'}{t} = \frac{1}{K}(n-1)+1.$$

Mais, par la loi des mineurs, on a $\frac{C'}{C} = \frac{t'^3}{t^3}$. Mettant dans cette dernière équation la valeur de $\frac{t'}{t}$ tirée de la précédente, il viendra

$$(a)\ldots \quad C' = C\left\{\frac{1}{K}(n-1)+1\right\}^3.$$

Si maintenant on fait jouer un fourneau *surchargé* quelconque, dans un terrain aussi quelconque, on aura tout ce qui est nécessaire pour déterminer le coefficient $\frac{1}{K}$, et par conséquent pour rendre la formule (a) immédiatement applicable au calcul de la charge de tout autre fourneau surchargé, dont le rayon d'entonnoir sera dans tel rapport n qu'on voudra avec la ligne de moindre résistance.

On croit savoir, par exemple, que dans un terrain exigeant 12 livres de poudre par toise cube, une charge de 3660 livres a produit un entonnoir d'un rayon égal à 36 pieds, sous une ligne de moindre résistance de 12 pieds. On a donc pour ce cas $n = 3$, et comme la charge du fourneau ordinaire correspondant à la moindre résistance de 12 pieds est de 176 livres, il s'ensuit qu'on a $\sqrt[3]{\frac{C'}{C}} = 2{,}75$, $\frac{1}{K} = 0{,}875$, et que l'équation (a) devient

$$C' = C\{(0{,}875)(n-1)+1\}^3,$$

ou bien $C' = C\{(0{,}875)n + 0{,}125\}^3$,

qui est la formule résultant de la méthode de MM. Gumpertz et Lebrun.

Or, il faut remarquer que cette formule repose sur une hypothèse dont on n'a donné *à priori* aucune raison mécanique satisfaisante. Rien ne prouve que le rapport entre les différences de rayon d'entonnoir dont on a parlé, soit une quantité constante pour tous les terrains et toutes les profon-

deurs de fourneau. Il serait, au contraire, plus naturel de penser que ce rapport est variable; alors chaque épreuve de fourneau surchargé conduirait à une formule particulière; et, en effet, voici le tableau de plusieurs formules déduites de l'équation (*a*) pour divers terrains dans lesquels on a fait jouer des fourneaux surchargés à des profondeurs différentes.

(Suit le tableau.)

INDICATION DES ÉPREUVES.	NATURE du terrain, exprimée par la quantité de livres de poudre nécessaire par toise cube.	LIGNES de moindre résistance, ou valeurs de z en pieds.	RAYONS des enton-noirs, ou valeurs de Z''.	CHARGES em-ployées.	FORMULES dérivées DE L'ÉQUATION (e).	Observa
	livres.	pieds.	pieds.	livres.		
$(b)^1$	14.	15.	20,083.	980.	$C' = C[(0,8924)n + (0,1076)]^3$	
$(b)^2$	12.	10.	19,25.	360.	$C' = C[(0,4781)n + (0,5219)]^3$	Experi douteuse.
$(b)^3$	12.	10.	22,665.	1,000.	$C' = C[(0,900)n + (0,0997)]^3$	
$(b)^4$	17.	15.	26,75.	2,400.	$C' = C[(0,8958)n + (0,1042)]^3$	
$(b)^5$	12.	12.	33.	3,000.	$C' = C[(0,8991)n + (0,1009)]^3$	
(b)	12.	12.	36.	3,660.	$C' = C[(0,8750)n + (0,1250)]^3$	Formule MM. Gu perat et L brun.
$(b)^6$	12.	20.	30.	2,530.	$C' = C[(0,9174)n + (0,0826)]^3$	
$(b)^7$	12.	18.	29,5.	2,403.	$C' = C[(0,9959)n + (0,0047)]^3$	
$(b)^8$	12.	15.	33.	3,000.	$C' = C(0,8820)n + (0,1180)]^3$	

On voit, par les différences que présentent ces formules suivant le terrrain et la profondeur des fourneaux qui ont servi à les établir, qu'aucune d'elles ne pourrait, à la rigueur, être adoptée pour tous les cas, et que, par conséquent, la proposition sur laquelle est basée l'équation (a) n'est effectivement pas exacte. Dès lors, la formule de MM. Gumpertz et Lebrun, ou toute autre semblablement déduite de l'équation (a), ne peut être regardée que comme une expression empirique, qui ne donnera des résultats approchés de ceux de l'expérience que par une compensation fortuite des différentes erreurs sur lesquelles elle est établie (*).

En adoptant, pour tous les cas, l'équation $(b)^6$ du tableau ci-dessus, qui s'accorde le mieux avec la plupart des anciens essais, on peut, à l'aide de la formule des mineurs, obtenir une autre équation qui donne immédiatement la charge d'un fourneau surchargé, en fonction de celle d'un autre fourneau surchargé quelconque. En effet, puisqu'on a

$$C = C\{(0,9174)\,n + 0,0826\}^3,$$

on aura pour un autre fourneau

$$C' = C_{,}\{(0,9174)\,p + 0,0826\}^3.$$

Mais, C et $C_{,}$ étant des charges de fourneaux ordi-

(*) M. Lebrun, en comparant aux expériences le résultat donné par la formule qu'il avait proposée en commun avec M. Gumpertz, a reconnu que cette formule devait être modifiée, et il a proposé celle-ci, $C' = C\{(0,91)\,n + 0,09\}^3$, qui diffère fort peu de la formule $(b)^6$ du tableau précédent.

naires, on a aussi $\frac{C}{C_1} = \frac{H^3}{h^3}$; il viendra donc, en combinant les deux premières équations,

$$C = C'' \frac{H^3}{h^3} \left\{ \frac{(0{,}9174)n + 0{,}0826}{(0{,}9174)p + 0{,}0826} \right\}, \text{ ou bien}$$

$$C = C'' \frac{R^3}{r^3} \left\{ \frac{1+p^2}{1+n^2} \right\}^{\frac{3}{2}} \left\{ \frac{(0{,}9174)n + 0{,}0826}{(0{,}9174)p + 0{,}0826} \right\}^3,$$

formule qui rentre aussi dans celle des *mineurs* pour le cas des entonnoirs semblables, parce qu'alors on a $p = n$.

Formule de M. d'Obenheim.

M. d'Obenheim, ayant remarqué que les différentes méthodes proposées pour le calcul des charges de mine se réduisaient à exprimer ces charges au moyen de la charge du fourneau ordinaire de même ligne de moindre résistance que le fourneau proposé, multipliée par une certaine fonction du rapport n du rayon tonnoir proposé à celui de l'entonnoir ordinaire, a supposé, d'après quelques conditions auxquelles cette fonction doit satisfaire, qu'elle pouvait être de la forme $\frac{(1+n^2)^2}{4}$; en sorte que la formule qu'il adopte à son tour est

$$C' = C \frac{(1-n^2)^2}{4},$$

laquelle exprime la loi que les charges des fourneaux de même ligne de moindre résistance sont comme les quatrièmes puissances des rayons d'explosion.

Cette formule équivaut donc à celle-ci,

$$C' = C_1 \frac{R^4}{r'^4}.$$

Mais, pour un autre fourneau quelconque, on aura aussi

$$C'' = C_{,,} \frac{r^4}{r''^4};$$

et comme la loi des mineurs donne $\frac{C_{,}}{C_{,,}} = \frac{r'^3}{r''^3}$, il viendra $C' = C'' \frac{R^4}{r^4} \frac{r''}{r'}$, ou bien $C' = C'' \frac{R^4 h}{r^4 H}$, parce que les rayons r', r'', sont proportionnels aux lignes de moindre résistance des deux fourneaux comparés.

La dernière formule exprime donc la loi plus générale, que les charges de deux fourneaux quelconques, placés en même terrain, doivent être en raison composée directe des quatrièmes puissances des rayons d'explosion, et inverse des lignes de moindre résistance. Si l'on en élimine ces lignes de moindre résistance, elle deviendra

$$C' = C'' \frac{R^3}{r^3} \sqrt{\frac{1+n^2}{1+p^2}},$$

et rentrera dans celle des mineurs, comme les autres formules, dans le cas des entonnoirs semblables.

On va faire maintenant une comparaison générale de toutes ces formules : mais, pour rendre cette comparaison plus facile, on prendra le cas où le fourneau d'épreuve est un fourneau ordinaire de même ligne de moindre résistance que le fourneau proposé, ce qui donnera $p = 1$; on désignera en outre par ω l'angle formé par le rayon d'explosion avec la ligne de moindre résistance, et l'on substituera à n sa valeur $\frac{\sin. \omega}{\cos. \omega}$. Alors on aura :

Pour la formule de Bélidor,

$$C' = C\frac{R^3}{r^3};$$

Pour celle de Muller,

$$C' = C\frac{R^3}{r^3}.2\cos.\omega\frac{(1-\cos.\omega)}{(\sqrt{2}-1)};$$

Pour celle de Mouzé,

$$C' = C\frac{R^3}{r^3}.2\sqrt{2}\cos.\omega\sin.^2\omega;$$

Pour celle de M. le général Marescot,

$$C' = C\frac{R^3}{r^3}.2\sin.^2\omega;$$

Pour celle de M. d'Obenheim,

$$C' = C\frac{R^3}{r^3}.\frac{1}{\cos.\omega-\sqrt{2}};$$

Pour celle de MM. Gumpertz et Lebrun,

$$C' = C\frac{R^3}{r^3}.2\sqrt{2}\left\{(0,9174)\sin\omega.+(0,0826)\cos.\omega\right\}^3;$$

d'où il sera aisé de conclure, en prenant *les rapports* de ces formules deux à deux, et en ne considérant que les fourneaux surchargés,

1.° Que la formule de Muller donnera des charges toujours plus grandes que celle de Bélidor, jusqu'à $\omega = 72^\circ\ 58'\ 10''$, c'est-à-dire, depuis $n = 1$ jusqu'à $n = 3,2646$ à peu près;

2.° Que la formule de Mouzé donnera des charges plus grandes que celles de Bélidor jusqu'à un évasement de fourneau de $64^\circ\ 7'\ 10''$ environ, ou jusqu'à $n = 2,064$, plus petites au-delà de cet évasement, et toujours plus petites que celles de Muller;

3.° Que la formule de M. le général Marescot donnera des charges toujours plus grandes que celles de Bélidor, de Muller et de Mouzé;

4.° Que la formule de M. d'Obenheim donnera des charges toujours plus grandes que celles de Bélidor, de Muller et de Mouzé, plus petites que celles de M. le général Marescot jusqu'à l'évasement indiqué ci-dessus de 64° 7′ 10″, et plus grandes au-delà de cet évasement;

5.° Qu'enfin la formule de MM. Gumpertz et Lebrun, établie sur l'expérience n.° $(b)^6$ du tableau ci-dessus, donnera des charges toujours plus grandes que celles de Bélidor, de Muller, de Mouzé, et de M. le général Marescot; plus grandes que celles de M. d'Obenheim jusqu'à l'angle d'évasement du fourneau de 68° 34′, correspondant à $n = 2,55$, et plus petites au-delà de cet évasement.

Formule de Gillot.

Feu le capitaine Gillot a donné aussi, dans son *Traité des mines*, une formule que l'on rapporte la dernière, parce que quelques personnes ont cru qu'elle était la plus générale et que les autres pouvaient s'en déduire. L'auteur a essayé de déterminer les cas où elle pourrait s'employer avec plus ou moins d'avantage; mais les considérations dans lesquelles il entre à ce sujet nous ont paru loin d'être fondées en raison. Quoi qu'il en soit, cette formule se trouve en supposant que la force résultant d'une charge de mine doit se composer de trois parties: l'une égale au poids du solide de terre à enlever; l'autre égale à la ténacité à vaincre dans les terres de ce solide, ténacité que l'on admet être proportionnelle

au poids même du solide; et la troisième égale au poids de la colonne d'air qui repose sur la base supérieure de l'entonnoir.

Soient en effet F la force développée par une charge de mine; K, K', K'', les trois parties de cette force dont on vient de parler; T le rayon de l'entonnoir, que l'auteur suppose être un cône entier; H la ligne de moindre résistance; γ le rapport de la ténacité à vaincre dans le solide de l'entonnoir au poids de ce solide; D la densité du terrain, celle de l'air étant 1; b la hauteur d'une colonne d'air de densité uniforme égale à 1, équivalente à la colonne effective qui pèse sur le fourneau. On aura

$$K=\pi T^2\frac{H}{3}D,\quad K'=\gamma\pi T^2\frac{H}{3}D,\quad K''=\pi T^2 b,$$

et par conséquent

$$F=K+K'+K''=\frac{\pi T^2}{3}\left\{(1+\gamma)HD+3b\right\}.$$

Si l'on désigne maintenant par f, t, h, d, b', γ', les quantités qui, dans un autre terrain, pour une autre atmosphère et un nouveau fourneau, correspondent aux quantités F, T, H, D, b, γ, on aura aussi

$$f=\frac{\pi t^2}{3}\left\{(1+\gamma')hd+3b'\right\};$$

et en supposant les charges proportionnelles aux forces, il viendra (C' et C'' étant ces charges)

$$C:C''::T^2[(1+\gamma)HD+3b]:t^2[(1+\gamma')hd+3b'],$$

proportion qui est celle de Gillot.

Si l'on suppose que les terrains sont égaux et que le poids de l'air est le même, cette proportion se change en celle-ci,

$$C:C''::T^2\left\{H+\frac{3b}{(1+\gamma)D}\right\}:t^2\left\{h+\frac{3b}{(1+\gamma)D}\right\},$$

laquelle rentrerait dans l'énoncé particulier de la loi de Mouzé, si l'on supposait égales les lignes de moindre résistance; c'est-à-dire qu'on aurait alors $C : C'' :: T^2 : t^2$.

On voit aussi que la proportion de Gillot rentrerait dans l'énoncé général de la loi de Mouzé, et par suite dans la loi des mineurs, pour les entonnoirs semblables, si l'on en supprimait le terme relatif au poids de l'atmosphère. Mais ce terme relatif au poids de l'air est précisément ce qui fait la distinction de la formule de Gillot. On peut donc remarquer que cette formule s'assimile à une formule reconnue défectueuse (celle de Mouzé), lorsqu'on n'y fait que des modifications qu'elle doit comprendre, et à une loi reconnue bonne (celle des mineurs), lorsqu'on y fait des changemens qui la dénaturent. On n'est, par conséquent, nullement fondé à dire que la formule de Gillot rentre dans les autres formules : elle ne rentre, à proprement parler, que dans la formule de Mouzé, c'est-à-dire, dans celle que les expériences signalent comme l'une des plus défectueuses.

Dans le cas de deux fourneaux établis dans un même terrain et sous une même atmosphère, la formule de Gillot sera de la forme

$$C = C'' \frac{T^2}{t^2} \left\{ \frac{H + A}{h + A} \right\},$$

A étant une constante; de sorte que si le fourneau d'épreuve est plus profond que ceux dont on cherche la charge (ce qui peut arriver), la formule de Gillot donnera des charges encore plus

petites que celles de Mouzé. Il n'est pas besoin d'en dire davantage pour montrer que cette formule est absolument vicieuse.

On voit, par ce qui précède, que les formules examinées donnent en général, dans l'ordre où elles ont été proposées, et pour les fourneaux très-surchargés, des charges de plus en plus fortes; et cela doit être en effet, car c'est parce qu'on a reconnu que dans ce cas les premières formules donnaient descharges trop faibles, qu'on en a successivement imaginé d'autres. D'où il semblerait suivre que la dernière de ces formules, c'est-à-dire, celle de MM. Gumpertz et Lebrun, récemment modifiée par ce dernier, doit être plus exacte que toutes les autres. Cette conséquence est juste quant aux faits connus; mais on a vu que cette formule repose sur une hypothèse non démontrée, et que les expériences mêmes sont loin de justifier complétement. En mettant la formule sous la forme $C' = C\{A(n-1)+1\}$, on pourra bien, après avoir déterminé la valeur du coefficient A pour chaque épreuve de fourneau connue, prendre une moyenne entre toute ces valeurs; mais ceue moyenne pourra différer notablement du coefficient relatif aux épreuves extrêmes : par conséquent, la formule ne donnera les charges correspondantes à ces épreuves que d'une manière assez inexacte. En un mot, la formule ne pouvant s'accorder avec les expériences connues que par une compensation inexpliquée entre l'erreur de la supposition fondamentale (si cette supposition n'est pas exacte) et d'autres erreurs inhérentes à la détermination des charges simples, on ne peut

garantir *à priori* son exactitude dans le cas d'expériences nouvelles.

Toutes les formules des fourneaux surchargés expriment la charge de ces fourneaux par celle du fourneau ordinaire, multipliée par une certaine fonction du rapport du rayon de l'entonnoir à la ligne de moindre résistance. Il n'est rien moins que certain que la même forme de fonction puisse convenir à tous les terrains et à tous les degrés de surcharge; c'est cependant ce qui s'est toujours supposé jusqu'ici. On pense donc que des expériences nouvelles devraient être dirigées non-seulement vers la détermination de la fonction dont il s'agit, mais aussi vers la question de savoir si cette fonction varie de forme d'un terrain à l'autre, et d'un degré de surcharge à un autre degré.

Malgré son imperfection théorique, la formule de M. Lebrun, lorsqu'on y met pour le coefficient constant le nombre 0,41, s'accorde assez bien, et mieux qu'aucune autre des formules proposées, avec la plupart des expériences faites sur les fourneaux surchargés; aussi paraît-on l'avoir adoptée spécialement dans les écoles des régimens du génie. On va terminer cette note en faisant connaître quelques autres formules dont on fait aussi usage dans ces écoles, pour produire les différens effets des mines que peut exiger la guerre souterraine. Ce sont encore les manuscrits de M. Lebrun qui ont fourni les données sur lesquelles ces formules sont établies.

Formule des fourneaux souschargés.

Le fourneau souschargé est celui dont le rayon d'entonnoir est plus petit que la ligne de moindre résistance; on l'emploie dans le cas où l'on ne veut produire au dehors que des entonnoirs très-rétrécis.

M. Lebrun a discuté le premier la théorie de ces sortes de fourneaux, et proposé pour la détermination de leurs charges une formule particulière, qui se déduit cependant des mêmes principes que la formule des fourneaux surchargés, ou plutôt qui n'est qu'un cas particulier de celle-ci. En effet, si l'on admet la constance du rapport des différences de rayons d'entonnoir dont il a été parlé, en prenant ces différences dans un sens inverse, on aura

$$\frac{t - T'}{t - t'} = K,$$

laquelle équation donne immédiatement cette autre,

$$(a')\ldots \quad C_1 = C\left\{1 - \frac{1}{K}(1 - n)\right\}^3,$$

C_1 étant la charge du fourneau souschargé.

Pour achever de déterminer cette formule, on peut choisir pour fourneau d'épreuve celui qui n'ouvre pas d'entonnoir au dehors. Or l'expérience a montré qu'en général si une certaine charge de poudre, placée sous une ligne de moindre résistance t, produit l'entonnoir ordinaire, cette charge cessera d'ouvrir un entonnoir lorsqu'on la placera sous une ligne de moindre résistance égale à $\frac{7}{4}t$; et réciproquement, que si une charge n'ouvre pas d'entonnoir sous la ligne de moindre résistance t, elle ouvrira

l'entonnoir ordinaire sous une ligne de moindre résistance égale à $\frac{4}{7}t$. Si donc la charge C_1 n'ouvre pas, par supposition, d'entonnoir sous la ligne de moindre résistance t du fourneau souschargé, elle ouvrira l'entonnoir ordinaire sous la ligne de moindre résistance $\frac{4}{7}t$. Mais alors on aura

$$C_1 : C :: (\tfrac{4}{7}t)^3 : t^3$$

il viendra donc $C_1 = C(\frac{4}{7})^3$. Substituant cette valeur de C_1 dans l'équation (a'), on tirera de cette équation $\frac{1}{K} = \frac{3}{7}$, et l'on aura par suite

$$C_1 = C\{1 - \tfrac{3}{7}(1 - n)\}^3,$$

ou bien $$C_1 = C\left\{\frac{3n+4}{7}\right\}^3,$$

qui est la formule des fourneaux souschargés proposée par M Lebrun, et dont on se sert maintenant dans les écoles régimentaires du génie, en attendant une théorie plus certaine.

A l'aide de cette formule et de celle des fourneaux surchargés, on peut déterminer d'une manière assez exacte la quantité de poudre φ qu'exige le mètre cube de chaque terrain : ce qui est, comme on sait, l'élément du calcul des charges des fourneaux.

Après avoir mis pour cela dans un terrain quelconque une charge déterminée par la formule des fourneaux ordinaires, et d'après une appréciation de la quantité φ, prise dans les tables de Vauban ou de tout autre auteur, on fera jouer le fourneau. Si le rayon d'entonnoir est plus grand que la ligne de moindre résistance, c'est que le fourneau était surchargé ; alors, substituant dans la formule des fourneaux surchargés les données que fournit cette épreuve, on en tirera

la valeur de φ. Chargeant ensuite un second fourneau ordinaire égal au premier, mais d'après la nouvelle valeur de φ, on mettra le feu. Si le rayon d'entonnoir est devenu plus petit que la ligne de moindre résistance, on considérera le nouveau fourneau comme souschargé, et l'on tirera de la formule qui appartient à ces fourneaux une valeur de φ plus approchée de la véritable que la première; et ainsi de suite (*).

Formules des rayons de commotion et de rupture.

Différentes expériences et remarques qu'on a faites sur les effets d'une charge de mine, ont conduit à supposer en général,

1.° Que, dans le sens horizontal, la commotion, produite par la mine est capable d'endommager une galerie jusqu'à une fois trois quarts la ligne de moindre résistance correspondante à la charge employée, considérée comme charge de fourneau ordinaire;

2.° Que, dans le même sens, la destruction des galeries est complète et certaine jusqu'à une distance égale au rayon d'explosion;

3.° Que, dans le sens vertical, la commotion destructive se fait sentir jusqu'à une distance égale au rayon d'explosion;

(*) Le procédé que l'on indique ici a été mis en pratique à l'école régimentaire du génie, à Metz, par MM. les capitaines du génie Savart et Vallenet; il conduit à une valeur de φ qui, si elle n'est pas la plus exacte dans le sens absolu, est au moins celle qui s'accommode le mieux avec l'emploi des formules d'où elle est tirée, pour produire les résultats qu'on attend de ces formules.

4.° Que, dans le même sens, la rupture est certaine jusqu'à une distance égale à la ligne de moindre résistance ;

5.° Que, dans le sens sous-horizontal, les rayons limites des commotions destructives sont les demi-diamètres d'une ellipse ayant pour centre le centre des poudres, pour demi-grand axe horizontal le rayon horizontal de commotion destructive extrême et pour demi-petit axe vertical le rayon de commotion destructive verticale ;

6.° Que, dans le même sens sous-horizontal, les rayons de rupture certaine sont les demi-diamètres d'une seconde ellipse ayant même centre que la première, et pour demi-grand et petit axes, les rayons horizontal et vertical de rupture certaine ;

7.° Que, pour les objets situés à la surface du terrain, la rupture peut avoir lieu jusqu'à une distance de la verticale passant au centre des poudres, égale à une fois et demie la ligne de moindre résistance.

D'après cela, si l'on désigne par C une charge quelconque de poudre, par h la ligne de moindre résistance du fourneau ordinaire correspondant à cette charge, par k les différens rayons de commotion destructive ou de rupture certaine, et par d la distance horizontale d'une galerie au centre des poudres, on aura d'abord

$$h = \sqrt[3]{\frac{6}{11} \cdot \frac{C}{\varphi}}; \qquad \ldots(1)$$

et ensuite, pour la formule du rayon horizontal de commotion destructive limite,

$$k = \frac{7}{4} h; \qquad \ldots(2)$$

pour la formule du rayon horizontal de rupture *certaine*,

$$k = \sqrt{2} \cdot h ; \qquad \ldots (3)$$

pour la formule du rayon vertical de commotion destructive limite,

$$k = \sqrt{2} \cdot h ; \qquad \ldots (4)$$

pour la formule du rayon vertical de rupture certaine,

$$k = h ; \qquad \ldots (5)$$

pour la formule du rayon sous-horizontal de commotion destructive limite,

$$k = \sqrt{\frac{17 \cdot d^2 + 98 h^2}{7}} ; \qquad \ldots (6)$$

pour la formule du rayon sous-horizontal de rupture certaine,

$$k = \sqrt{\frac{2 h^2 + d^2}{2}} ; \qquad \ldots (7)$$

et enfin pour la formule du rayon limite de rupture relativement aux objets placés à la surface du terrain,

$$k = \sqrt{13} \cdot \frac{h}{2} . \qquad \ldots (8)$$

Une charge de poudre étant donnée maintenant, si l'on veut connaître les différens effets qu'elle peut produire dans un terrain connu, on calculera d'abord la ligne de moindre résistance du fourneau ordinaire correspondante à cette charge ; puis, au moyen des équations précédentes, on aura toutes les distances de commotion destructive et de rupture complète qu'on voudra connaître.

Si c'est seulement la position respective du centre des poudres et des objets à détruire qui est connue,

et qu'on veuille en déduire la quantité de poudre à employer, on déterminera d'abord, au moyen des équations précédentes, la ligne de moindre résistance h; ensuite on trouvera la charge correspondante à cette ligne au moyen de la formule (1) des fourneaux ordinaires.

Formules des camouflets.

Le camouflet est un fourneau dont l'effet est tout intérieur. Ainsi la plus forte charge qu'on puisse faire agir en camouflet contre un point souterrain, est celle qui n'ouvre pas d'entonnoir au dehors. Si donc H est la plus courte distance du centre des poudres à la surface extérieure du terrain, et $C_{\prime\prime}$ la charge *maximum* du camouflet, on aura

$$C_{\prime\prime} = C\left(\frac{4}{7}\right)^3 = \frac{352}{1029}\,\varphi\,H^3.$$

D'un autre côté, en désignant par D la distance du point contre lequel on veut agir au centre des poudres, la moindre charge sera donnée par la formule $C_{\prime\prime} = \frac{352}{1029}\,\varphi\,D^3$; en sorte que si D est plus grand que H, on ne pourra donner le camouflet proprement dit. Si D est plus petit que H, on aura deux limites des charges permises, entre lesquelles on pourra choisir, suivant l'intensité de l'effet qu'on veut produire. En général, la bonne charge du camouflet devra se tirer des formules des rayons de rupture complète, dans lesquelles on mettra à la place de k la distance donnée D, et à la place de h l'expression $\sqrt[3]{\frac{6}{11}\times\frac{C}{\varphi}}$, à laquelle elle est égale.

Si, par exemple, le point auquel on veut donner le camouflet est situé sur le même plan horizontal que le centre des poudres, la bonne charge du camouflet sera donnée par la formule (3); c'est-à-dire qu'on aura $C_n = \frac{11\sqrt{2}}{24} \varphi D^3$; et ainsi des autres positions (*).

D'après toutes les expériences anciennes, *on* devrait prendre pour les terres ordinaires $\varphi = 0^k,79$. Cependant, si l'on déduit cette quantité de divers essais corrigés par les formules de M. Lebrun, on pourra trouver d'autres valeurs. A Metz, par *exemple*, pour des terres réputées communes, et pesant 2000 kilogrammes le mètre cube, MM. les capitaines du génie, Vallenet et Savart ont trouvé qu'il suffisait de prendre $\varphi = 0^k,57$.

Les formules qu'on vient de rapporter ne sont pas au surplus infaillibles; ce sont seulement les moins inexactes, qu'on connaisse dans l'état actuel de l'art des mines. On a cru utile de les mettre sous les yeux des officiers du génie, parce qu'elles peuvent *servir* de point de départ pour les essais de mines qu'on pourrait avoir à faire, et pour la recherche d'autres formules plus propres à représenter les résultats variés de l'expérience.

(*) Si l'on se propose de détruire une longueur déterminée de galerie, on remarquera qu'en mettant le centre des poudres dans un plan perpendiculaire au milieu de cette longueur, la distance à laquelle il faudrait les placer doit être le côté d'un triangle rectangle, dont l'hypoténuse est le rayon de commotion destructive extrême correspondant à la charge, et l'autre côté la demi-longueur à rompre. On aura donc une équation qui fera connaître l'une des trois longueurs lorsque les deux autres seront données.

NOTE

SUR

UNE NOUVELLE DISPOSITION DE LATRINES;

Communiquée par M. CARALERO, garde du génie employé au dépôt des fortifications.

L'ODEUR incommode des latrines provient de ce que les gaz méphitiques qui se dégagent sur la superficie des matières contenues dans la fosse, peuvent remonter par les tuyaux de descente, et se répandre dans le local de la latrine. Nul doute que si l'on donnait à ces vapeurs une issue différente, de manière qu'il ne pût en sortir par l'orifice des tuyaux que ce qui se dégage sur la portion de superficie correspondante à la section de ces tuyaux, on ne parvînt à diminuer beaucoup la mauvaise odeur, si l'on ne s'en délivrait pas entièrement.

L'appareil de Woulf donne un moyen simple de résoudre ce problème. On conçoit, en effet, que si les tuyaux de descente plongeaient dans la matière de la fosse, dont la liquidité est toujours suffisante pour cela, il ne pourrait s'échapper par les orifices que la petite quantité de vapeurs méphitiques qui se dégagerait dans l'intérieur même de ces tuyaux. Le reste, conduit au dehors par des tuyaux d'évent élevés

jusqu'au-dessus du faîte du bâtiment, se perdrait dans l'air sans occasionner aucune mauvaise odeur.

Tel est l'objet d'un dispositif communiqué par M. Caralero, garde du génie, qui l'a apporté de Madrid, où il est depuis long-temps mis en usage avec succès. Il est représenté *planche VI*, avec tous les détails nécessaires pour en faciliter l'intelligence. Il suffira de donner la légende des figures qui composent ce dessin.

m, *m*.. Tuyaux de descente des latrines.

n, *n*... Auges en pierre, en forme de cuvette, dans lesquelles plongent les tuyaux de descente, et d'où la matière se déverse dans la fosse.

o, *o*... Regards pratiqués dans la voûte de la fosse, au-dessus de chaque cuvette, pour les nettoyer au besoin, ou en retirer les objets qu'on pourrait y avoir laissé tomber.

p..... Regard pour descendre dans la fosse et la vider.

q..... Tuyau d'évent pour conduire les vapeurs méphitiqués au dehors de la fosse.

r..... Urinoire.

On pense que cette disposition pourra s'appliquer avec avantage aux latrines des casernes, et principalement aux latrines des officiers. Il n'est pas à craindre que les tuyaux ni les cuvettes puissent s'engorger, pour peu que les latrines soient fréquentées; dans le cas contraire, on pourra toujours rétablir l'usage et la propriété de cet appareil, en versant de l'eau dans les cuvettes de temps en temps.

L'appareil de Woulf peut trouver aussi diverses applications analogues à celle qu'il reçoit ici pour les latrines. A Londres, on le fait servir aux égouts publics, pour empêcher que les vapeurs malfai-

santes qui se dégagent des aqueducs ne se répandent dans les rues. On pratique pour cet objet, en contre-bas du sol des aqueducs, et vis-à-vis la tombée des tuyaux verticaux qui reçoivent les eaux et les immondices, des excavations en forme de cuve, toujours remplies du liquide des aqueducs, dans lequel plonge le bout même des tuyaux de descente, en sorte qu'aucune vapeur ne peut remonter dans les rues par ces tuyaux.

On va rapporter ici, pour terminer cette note, un autre moyen d'assainissement des latrines, qui se trouve décrit dans le tome VII des *Annales de l'industrie nationale et étrangère.* Il consiste à faire partir de la voûte de la fosse un tuyau ou canal quelconque, qui, après avoir passé sous une portion du bâtiment dans lequel se trouvent les latrines, vienne s'adosser extérieurement à la plaque en fonte d'une cheminée de cuisine, et remonte avec le tuyau de cette cheminée (qu'il doit dépasser d'environ deux mètres) jusqu'au-dessus du faîte du bâtiment.

On voit tout de suite l'objet de ce dispositif : l'air contenu dans le tuyau, se trouvant échauffé par le voisinage de la cheminée, se dilate et tend à s'élever vers la bouche supérieure du tuyau, ce qui établit un courant ascensionnel qui aspire continuellement l'air de la fosse et du cabinet des latrines, en empêchant qu'aucune puanteur ne remonte vers ce local. Les vapeurs méphitiques sont ainsi attirées vers le haut du tuyau, d'où elles se répandent dans l'atmosphère, sans causer aucune incommodité.

Dans le cas où l'on n'aurait pas la facilité d'échauffer le tuyau conducteur par le contact d'une cheminée, on peut y suppléer par une lampe ou un quinquet qu'on ferait brûler dans son intérieur et vers sa partie supérieure, ou par un jet de vapeur d'eau qu'on y ferait déboucher. Ce moyen d'attirer les gaz méphitiques est à la vérité plus embarrassant que le premier; mais il est des établissemens, comme celui d'un hôpital, par exemple, où il importe assez de prévenir toutes les causes d'insalubrité, pour qu'on doive l'adopter malgré la sujétion qu'il présente.

Afin que le tuyau aspirateur remplisse *toujours* son office, il convient de lui donner une grosseur proportionnée au nombre de siéges dont se compose la latrine. Il faut, d'ailleurs, avoir soin de tenir habituellement les orifices de ces siéges à demi-bouchés par les tampons, afin que le courant ascensionnel soit bien déterminé, et acquière même une certaine vîtesse. Il importera aussi de prévenir toutes les causes d'échauffement de l'air dans le cabinet des latrines et dans les lieux voisins; car *le courant* désinfectant pourrait s'établir en sens contraire, et répandre par-tout la mauvaise odeur.

Enfin, il faut éviter de faire déboucher le tuyau conducteur des gaz délétères dans celui d'une cheminée: on courrait risque d'introduire, par ce canal, l'odeur méphitique dans les appartemens, toutes les fois que des temps bas ou des raffales de vent feraient fumer cette cheminée.

NOTE

SUR

LES COUVERTURES EN PLOMB,

DES MAGASINS À POUDRE.

Les couvertures en plomb, pour peu qu'elles soient convenablement établies, n'exigent presque aucun entretien; ce qui, indépendamment de l'économie qui en résulte, a pour les magasins à poudre, dont les voûtes doivent être recouvertes d'une couche de terre, le précieux avantage d'éviter que, pendant le temps qui s'écoule nécessairement entre l'avarie causée par un ouragan et la réparation, les eaux pluviales ne viennent imbiber les terres et occasionner une humidité nuisible, tant à la chape de la voûte, qu'aux bois qui supportent la couverture.

La grande dépense que nécessite une couverture en plomb aurait été cependant un obstacle à ce qu'on en adoptât l'usage pour les magasins à poudre, si l'on n'eût remarqué que dans presque toutes les places l'artillerie conserve pour le cas de siége un approvisionnement considérable de plomb en saumon. Or, comme ce plomb, une fois laminé, se retrouverait aussi facilement au besoin sur les couvertures des magasins à poudre que dans les dépôts de l'arsenal, il est évident que, dans l'évaluation des couvertures

en plomb, on ne doit plus tenir compte de la valeur de la matière employée, mais seulement des frais de laminage et de pose; ce qui, comparativement à la dépense qu'exige une couverture en ardoise, donne ordinairement une légère différence en faveur de la couverture en plomb.

D'après ces considérations, S. Exc. le ministre de la guerre, sur la proposition du comité du génie, a, le 23 janvier 1822, décidé que, dans les places où l'artillerie conserve un approvisionnement permanent de plomb en saumon, les couvertures des magasins à poudre à construire seraient faites en plomb.

Déjà cette mesure a été exécutée dans plusieurs places; mais on a eu occasion de remarquer que quelquefois les officiers du génie étaient restés incertains sur le meilleur mode à employer pour la pose de ces couvertures, et que quelques-unes des dispositions adoptées par eux avaient mal réussi. En conséquence, il a paru utile de publier une description du mode suivi dans l'exécution d'une semblable couverture, qui, depuis plus de cinq ans qu'elle est établie, n'a éprouvé aucune altération, et peut par conséquent être considérée maintenant comme ayant subi toutes les épreuves de l'expérience, et n'avoir plus d'autre terme de durée que celle des bois qui la supportent.

L'inclinaison donnée à cette couverture est de trois de base pour deux de hauteur. Cette inclinaison doit varier suivant que la neige a plus ou moins de permanence dans le pays; mais la pente sera toujours plus douce qu'elle ne pourrait l'être si l'on employait des ardoises; ce qui a l'avantage de permettre

d'exhausser les culées au-dessus de la naissance des voûtes, et par conséquent d'augmenter leur résistance.

La cape de la voûte est établie dans un plan à peu près parallèle à l'inclinaison adoptée pour la couverture. Les culées et les pignons sont relevés de $1^{m},20$ au-dessus de cette cape, sur une épaisseur suffisante pour soutenir la couche de terre, épaisse d'un mètre, qui doit recouvrir la voûte. On a soin de ménager dans les culées, au niveau de la cape, quelques barbacanes pour l'écoulement des eaux, en cas que par suite de quelque accident fortuit les terres soient mouillées.

Sur le sommet des pignons on pose le faîtage, et l'on appuie sur ce faîtage et sur le sommet des culées les chevrons qui doivent porter la couverture; mais comme dans les grands magasins la portée de ces pièces serait trop considérable, on élève, sur le sommet de la cape et sur chacune des pentes, de petits dés en maçonnerie qui supportent le faîte, et un ou deux cours de pannes sur lesquelles reposent les chevrons. Il faut avoir soin de construire ces dés, dont la section horizontale est un rectangle, de manière que la diagonale soit dans le sens de la pente de la cape, afin que l'humidité ne puisse pas séjourner à leur pied.

Lorsque ces maçonneries sont élevées et que les terres sont à pied d'œuvre, on étend la chape sur la cape, en ayant soin de relever les couches le long des parois des murs jusqu'à une hauteur de 15 à 20 centimètres. Le devis joint à l'analyse-modèle décrit la composition de ces chapes; on se bornera ici à faire

connaître qu'on a obtenu d'autant plus de succès de ces chapes, qu'on a pu les couvrir plus promptement de terre, ce qui, en interceptant l'action immédiate de l'air et du soleil, prépare un durcissement plus lent et évite les fissures.

Lorsque les terres sont placées sur un mètre d'épaisseur, suivant la pente adoptée pour le toit, on pose le faîte et les pannes, et par-dessus, les chevrons. Sur ces chevrons on cloue un plancher en feuillets, et l'on fait déborder ce plancher de 7 à 8 centimètres, tant sur les pignons que sur les pieds-droits du bâtiment. On a soin de ménager dans la partie supérieure des pignons quelques créneaux, afin que l'air circule librement entre les terres et la charpente.

Les tables de plomb ont des dimensions variables. On choisira les laminoirs qui procurent les tables de plus grandes dimensions; mais vraisemblablement on ne pourra pas avoir des tables assez longues pour descendre du faîte jusqu'au bas du toit. On sera donc obligé de faire chaque pan du toit en deux longueurs, et on réservera la plus grande, c'est-à-dire, les tables entières, pour la partie supérieure.

Afin de lier latéralement entre elles les lames de plomb, on relevera rectangulairement le bord de la première table posée, sur une hauteur de 3 à 4 centimètres, et l'on fera envelopper ce rebord par la table posée à côté, dont le bord sera lui-même relevé et reployé, de manière à former rainure pour loger le bord de la première table. On formera de cette manière, dans un plan vertical, une arête qui, composée de trois épaisseurs de lames faisant

ensemble o^{m},009 environ, aura une certaine consistance, qu'on augmentera encore en la battant fortement entre deux masses de bois.

On rattachera ainsi latéralement les unes aux autres les lames posées vers le bas de la couverture, en ayant soin de les recourber au-dessus du plancher, et de les faire descendre un peu dans le chêneau qui régnera le long des pieds-droits, au-dessous du versant de la couverture.

On fixera ces lames sur le plancher, au moyen de clous à large tête enfoncés à l'extrémité supérieure de la table dans les chevrons. Mais comme, par suite de la dilatation, les lames s'allongeront sensiblement, il faut pratiquer au-dessous des clous une petite mortaise dans la table de plomb, selon le sens de la pente, afin que cette table puisse s'étendre facilement, soit en remontant vers le faîte, soit en descendant dans le chêneau. A cet effet, on devra avoir soin que le clou ne soit pas assez enfoncé pour que la tête touche au plomb.

Un premier rang de lames étant posé vers le bas du pan de couverture, on fait partir du faîte un second rang de tables entières, qui sont unies latéralement comme les premières, et qui doivent les recouvrir de 15 à 20 centimètres ; mais afin que l'allongement des tables supérieures ne soit pas contrarié par l'adhérence des arêtes dans la partie en recouvrement, on doit avoir soin, lorsqu'on frappe l'arête dans cette partie, d'introduire de chaque côté de l'arête des lames inférieures un ciseau de charpentier qui maintienne assez de jeu pour que l'arête des lames supérieures puisse glisser facilement.

On ne doit pas clouer immédiatement le rang supérieur des tables sur le faîte; on prépare seulement les petites mortaises ou fentes suivant le sens de la pente, dans lesquelles les clous doivent entrer; ensuite, on place longitudinalement sur le faîte même une table qui, ployée sur les deux pans de la couverture, recouvre de chaque côté la tête du rang supérieur des tables. Cette table du faîte est fixée par les clous qui entrent dans les petites mortaises ménagées au haut des lames supérieures de la toiture; et comme elle est également susceptible de s'allonger par la dilatation, on a soin de ménager, dans le sens longitudinal, de semblables mortaises horizontales, pour que la lame puisse à volonté s'étendre vers l'un ou l'autre pignon.

Les têtes de clous du rang inférieur des tables sont recouvertes par les tables du rang supérieur, mais rien ne recouvrirait les têtes des clous qui fixent la table du faîte à celle du rang supérieur. Ces clous seraient ainsi exposés à la rouille; et, d'ailleurs, les petites mortaises dont nous avons parlé laisseraient pénétrer les eaux pluviales. Pour obvier à cet inconvénient, on met par-dessus chaque tête de ces clous une calotte en plomb de 10 à 12 centimètres de diamètre, qu'on soude ensuite soigneusement sur la table du faîtage.

Les tables qui descendent le long des pignons, les débordent de 20 à 25 centimètres, afin de pouvoir être reployées au-dessous du rebord du plancher, et former une espèce de bordure autour des pignons, de même que le rang inférieur des tables en a formé une au-dessus des pieds-droits.

On remarquera que, par cette disposition, tous les inconvéniens qui pourraient résulter de la dilatation par suite de l'action de la chaleur, sont prévenus, puisque l'allongement de chaque rang de tables s'opère librement, et que l'élargissement de chaque table ne tend qu'à rendre les arêtes un peu plus saillantes. Ces arêtes, par leur roideur, contribuent d'ailleurs à maintenir la surface de chaque pan de couverture dans un plan régulier, et leur saillie est encore avantageuse en ce sens que, lors des orages, elles divisent les eaux pluviales et les répartissent également dans les chêneaux.

Le Colonel du génie, L.

FIN.

ERRATA DU 7.e NUMÉRO DU MÉMORIAL.

PAGE 59 ligne 7, en remontant, *au lieu de* n'était qu'un réseau, *lisez* s'était changé en un réseau.
60, 3, *au lieu de* les qualités, *lisez* ces qualités.
67, 19, *ajoutez en marge* Planche I.re
87, 5, *au lieu de* (figures 1 et 2), *lisez* (figure 2).
89, ligne dernière, *après le mot* projectile, *mettez un point.*
92, ligne des boulets de 36, *au lieu de* 16,71 | 16,81, *lisez* 17,04 | 17,14.
idem, ligne 2 de la note, *mettez un point et virgule à la fin de la ligne.*
98, 12, *au lieu de* 47,900 centimètres, *lisez* 45,900 centimètres.
114, 4, en remontant, *au lieu de* 26, *lisez* 16.
121, 4, en remontant, *au lieu de* 18 lignes, *lisez* 8 lignes.
129, 21, *au lieu de* de 37, *lisez* de 39.
145, 3, *au lieu de* le, *lisez* la.
146, 6, en remontant, *au lieu de* 8 à 9, *lisez* 8 à 90.
155, 2, en remontant, *au lieu de* 4m 80, *lisez* 4,80.
156, 157, 158, 159, 160, même correction.
157, ligne dernière, *au lieu de* 0,88, *lisez* 0,80.

Page 169, lig. 13, *au lieu* du coefficient $\frac{3fr}{\rho b}$, *lisez* $\frac{3f'r}{\rho b}$.

173, 8, expression (3), *au lieu* du facteur $(x - d + d\cos.\varphi)^2$, *lisez* $(x - d + d\cos.\varphi)^2$.

Idem, 10, expression (4), *au lieu* du facteur $\frac{\rho^2 b^2}{6\cos.^2\varphi}$, *lisez* $\frac{\rho^2 b^2}{4\cos.^2\varphi}$.

178, 7, *fermez la parenthèse après les trois termes du dernier facteur, au numérateur du second membre de l'équation.*

177, 13, *au lieu de* en la substituant dans l'équation (7), *lisez* en la substituant à la place de H dans l'équation (7).

178, 3, *au lieu de* $\left[H'^{\frac{3}{2}} - (H' - d')(1 - \cos.\varphi)^{\frac{3}{2}}\right.$

lisez $\left[H'^{\frac{3}{2}} - (H' - d(1 - \cos.\varphi))^{\frac{3}{2}}\right]$.

186, 5, en remontant, *au lieu de* une autre inclinaison, *lisez* une certaine inclinaison.

188, 15, *indiquez l'équation par la lettre* (e), *mise en marge.*

191, 6, *au lieu de* $A = 8,337500$, *lisez* $A = 0,337500$

193, 9, en remontant, *au lieu de* C, C, C, *lisez* G, G, G.

209, 1 et 2 de la note, *au lieu de* à la place de x', sa valeur tirée de l'équation (1), *lisez* à la place de $\frac{dx}{d}$ sa valeur tirée de l'équation (1).

Idem, ligne suivante, *au lieu de* $z' = \frac{3}{2} R \frac{2l}{el'}$,

$$z' = \frac{3}{2} R^2 . \frac{l}{el'}$$

215, ligne 4, *au lieu du terme* $\left(\frac{L - L'}{2L}\right)^2$, *lisez* $\frac{(L - L'}{2L}$

234, 18, *au lieu de* ne peut entrer en mouvement, &c. *lisez* ne peut, après avoir été comprimé, entrer en mouvement et être chassé avec une vitesse comparable à celle du fluide dégagé.

Idem, 20, *effacez* après avoir été comprimé.

250, 15, *au lieu de* tonnoir, *lisez* de l'entonnoir.

254, ligne dernière, *au lieu du terme* $\frac{3b}{1 + \gamma} D$, *répété deux fois dans cette ligne, lisez* $\frac{3b}{(1 + \gamma) D}$

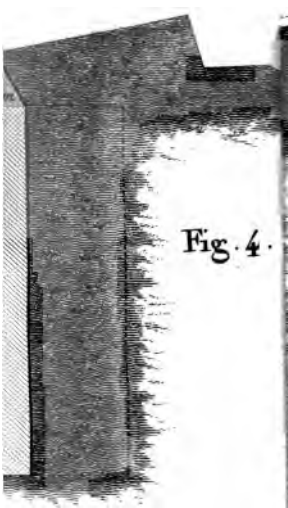
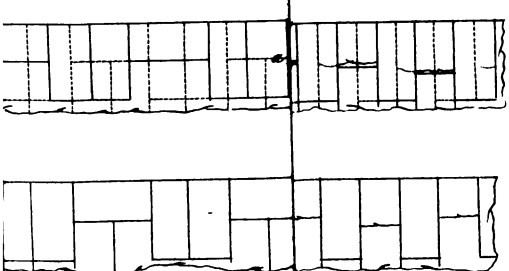


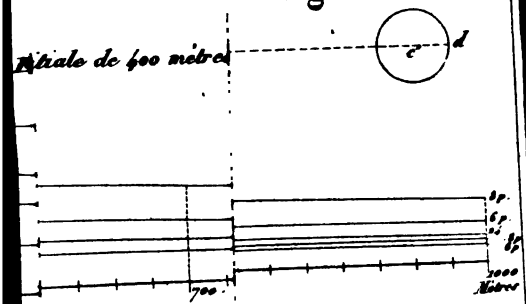
Fig. 4.

Fig. 5.



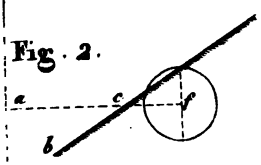
200 Metres.

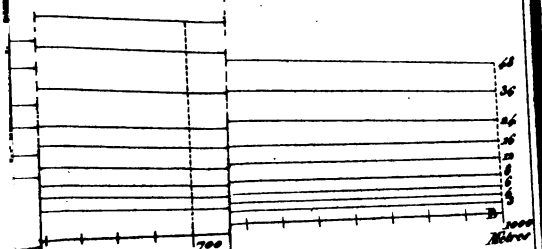
Fig. 1ère



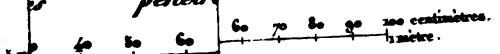
naires.

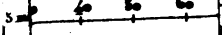
Fig. 2.





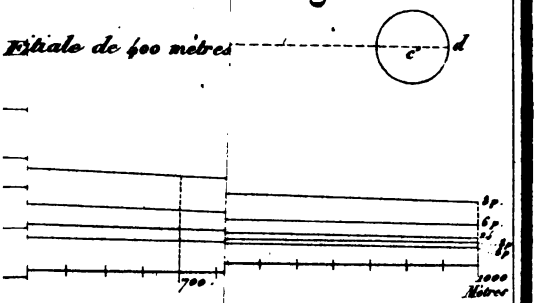
pénétr





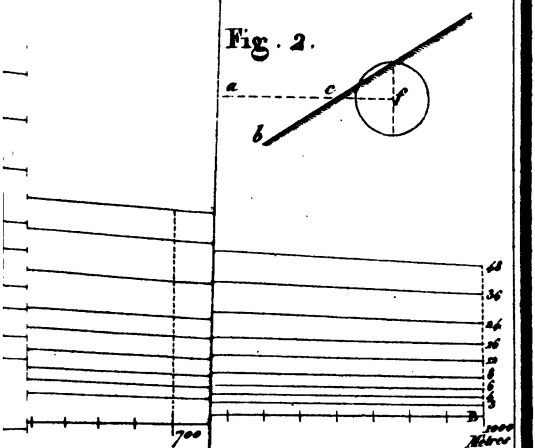
ssonnerie de Moellon briques.

Fig. 1ère

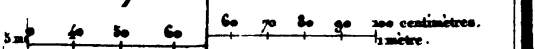


naires.

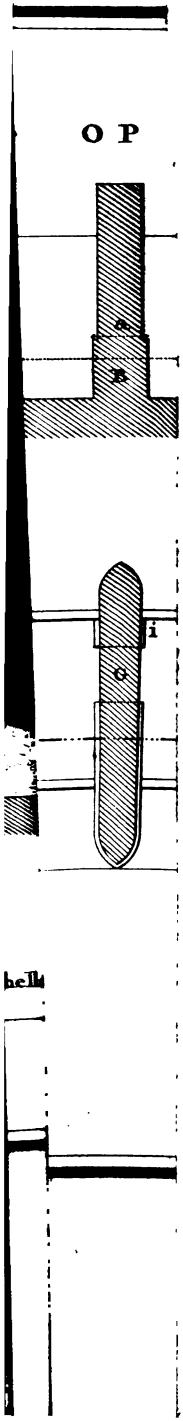
Fig. 2.



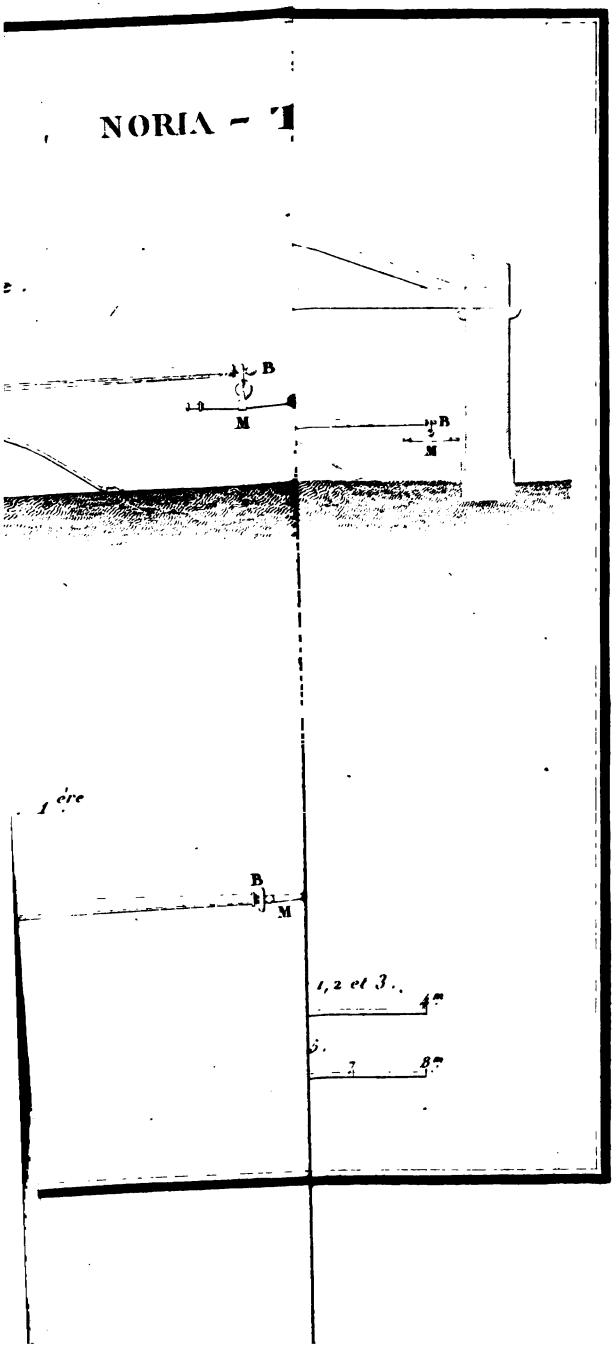
pénétr

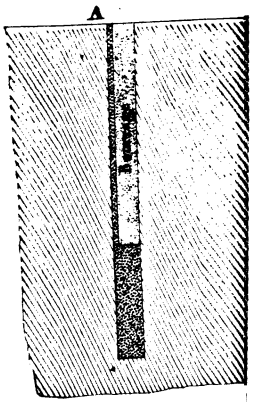


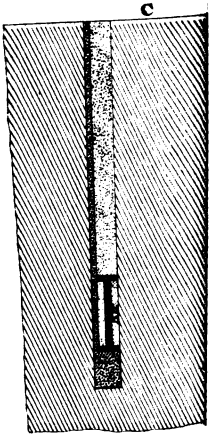
briques.

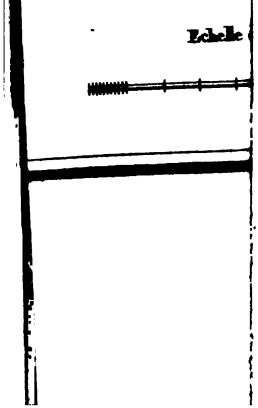

O P
a
B
i
G
bell

NORIA – 1



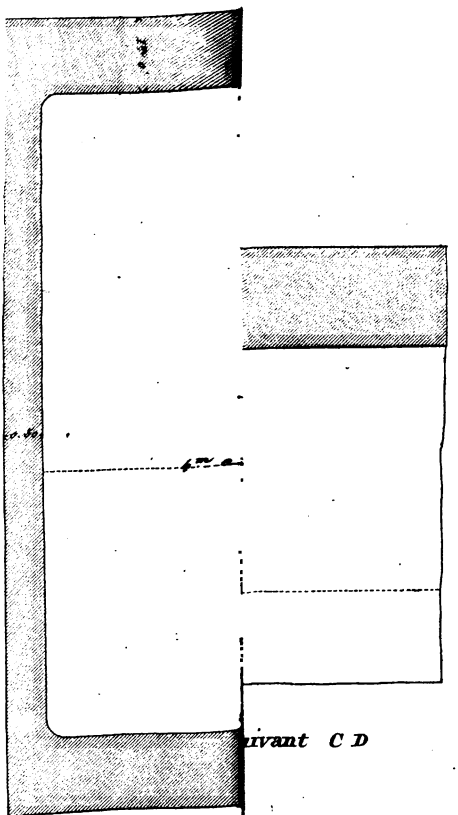

A


C


Echelle

F[illegible]AILS

suivant A B



ivant C D

10 Mètres

Echelle de 0.m05. pour 2 Mètres.

2 Mètres

-tifications, du Dépôt de la Marine, de l

HDI
HW 27FY E

This book should be returned
the Library on or before the last
stamped below.

A fine of five cents a day is incu
by retaining it beyond the speci
time.

Please return promptly.